

Biological autonomy and control of function in circadian cycle

Chul-wook Park*

International Institute for Applied Systems Analysis

[Purpose] The present study explored biological autonomy and control of function in circumstances that assessed a presumed relationship to an environmental cycle. An understanding of this behavior appeals to the organism-environment system rather than simply the organism—we seek to expose the laws that underlie end-directed capabilities by measuring biological characteristics (motor synchrony) in an environmental cycle (circadian temperature). **[Methods]** Participants (n = 24) at the University of Connecticut (Storrs, USA) and the Seoul National University (Seoul, Korea) served in the study. The production of in-phase bi-manual coordination was examined at different circadian points (allowing comparison of day-night temperature effects) in two experimental designs; (1) normal temperature embedded in a 24 hour cycle (5:00, 12:00, 17:00, and 24:00), and (2) normal versus abnormal temperature [artificially decreasing or increasing] while embedded at two points (5:00 am, 5:00 pm) during the circadian process. A typical bi-manual stability measure varied significantly as a function of the day-night temperature cycle. **[Results]** While (i) circadian effects under the artificially perturbed temperature manipulation were not straightforward along the day-night temperature cycle, (ii) the circadian effect divided by the ordinary circadian seems to be constant along the day-night temperature cycle. **[Conclusions]** The discovery of direct and robust relation between biological aspects (body temperature and motor synchrony) an environmental process (circadian temperature cycle) may echo adaptation of our biological system to the environment. This relation supports the claim that the organism and the environment should be considered as integrated system in which biological (or physical) dynamics takes place as a mutual factor.

Key words: Physical intelligence, Bi-manual coordination, Circadian rhythm, Thermodynamics, Context dependency

서론

환경체계에 내재되어 있는 유기체의 적응에 대한 관심은 지각과 동작의 연속성(perception-action coupling: Gibson, 1950)이라는 개념이 다루어지면서부터 주목을 받았다. 단순히 유기체라기보다 유기체-환경(organism-

environmental) 상호작용 체계라는 측면에서 신체 작용을 환경적 특질에 결합하는 자연적 법칙으로써 해석하고(Turvey, Shaw, Reed, & Mace, 1981), 어떤 조건하에서 신체 스스로 이루어내는 잠재성을 관찰 할 수 있다는 것에 초점을 맞추고 있다.

몇 가지 예를 들어보면, 나무 주변의 덩굴은 스스로 그 나무가 형성하고 있는 어두운 곳(skototropism)으로 자라난다(Strong & Ray, 1975). 전기화학 집합체(electrochemical assemblages) 바닥의 쇠를 함유하고 있는 황산염들은 스스로 자극에 감응하며 점진적으로

논문 투고일 : 2018. 03. 25.

논문 수정일 : 2018. 05. 29.

게재 확정일 : 2018. 08. 23.

* 교신저자 : 박철욱(pcw8531@gmail.com).

어떤 구조를 형성하였고(Cariani, 1993), 세포를 가는 쇠 실을 이용해서 절단하자 6시간이 지나지 않아 세포의 섬유들은 잘려진 공백을 채우고 망가진 세포벽을 다시 정렬시켰다(Ford, 2008).

여기서 흥미로운 사실은 실제로 그들 주체가 어떻게 지각된 의미를 인식하고, 그들을 둘러싼 상황에 맞게 동작을 재조직하며, 나아가 어려운 문제에 봉착했을 때 스스로 적응을 이루어내고 있는지 모르고 있다는 것이다(Reed, 1996). 그리고 우리는 이러한 일들에 대해 그들의 신경 체계가 필수적인 조건이 아니라는 분류에서 '물리적 지능(Physical Intelligence: PI)'이라고 지칭(Turvey & Carello, 2012)한다. 왜냐하면 에너지 흐름에 내재된 운동 능력의 원천이 그 신체 또는 부위가 머물고 있는 장소에 적절히 적응하고 있다면, 이러한 내·외적 자기감재성의 관계는 특별하게 중추 신경의 작용과 구분되는 행동적 적응(Iberall, 1977)에 의해 안내되는 지능의 형태를 만드는 것이라고 할 수 있기 때문이다(Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA, 2009).

본 연구는 위와 같은 제안(유기체의 지각은 환경적 특질과 그들의 행동에 속한 내·외적 구조의 연합)에 고무되어 우리의 내적 특질을 잘 대변하는 인지·행동적 특성(elementary coordination)이 생태학적 수준에서 과제로서 적절하거나 부적절한 환경적 구조(environmental cycle)화에 의해 어떤 현상을 이루어내는지 알아보고자 하였다.

이를 위해, 먼저 환경적 맥락에 내재된 유기체의 기본 특성으로서 일주기(circadian rhythm)를 바탕으로 하고 있다. 밤·낮의 온도 주기는 약 24시간을 기준으로 순환한다(Maury, Ramsey, & Bass, 2010). 그 주기를 따라가 보면 오전(약)5시에 가장 낮고, 오후(약)5시에 가장 높게 나타나는데, 우리 생체의 24시간 온도 주기 역시 오전(약)5시에 가장 낮고, 오후(약)5시에 가장 높은 것으로 알려져 있다(Aschoff, 1983). 이는 환경적 밤·낮의 24시간 온도 주기와 우리 몸의 온도 주기가 거의 유사하게 진행되는 과정(Krauchi & Wirz-Justice, 1994)이라는 것이다(Fig. 1, 위쪽).

또한, 실제 일주기 연구들에 의하면, 우리의 인지 수행 능력은 밤과 낮의 24시간 온도 주기를 거의 유사하게 따르고 있다(Fig. 1, 오른쪽)는 것을 보고하기(Johnson, Duffy, Dijk, Ronda, Dyal, & Czeisler, 1992) 때문

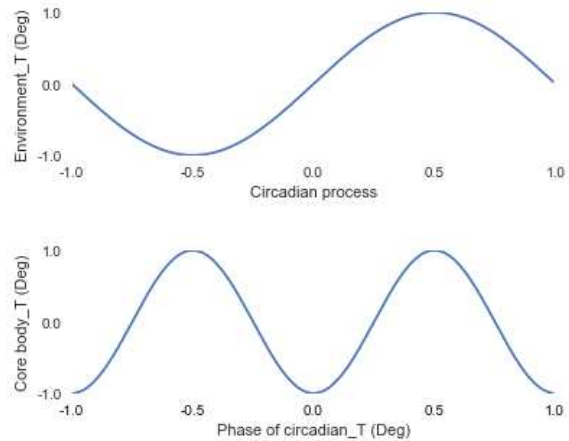


Fig. 1. Representation of the circadian rhythm. The plot on the upper denotes circadian process oscillation. the plot on the bottom denotes temperature process oscillation between the circadian temperature (horizontal axis) and the body temperature (vertical axis).

에 이 주기에 따른 수행 변화에 관심을 두었다.

다음으로 이러한 주기 특성에 따른 행동적 적응의 구조적 안정성을 추정하기 위해 움직임의 협응을 비선형역학(nonlinear dynamics)으로 설명하는 모형에 바탕을 두고 있다(자료 분석 모형 참고). 이는 움직임을 형성하는 기능과 형태를 운동의 변수와 안정적 특성의 비선형적인 협응 구조(coordination structure: Bernstein, 1967)로 분석하고자 하는 측면이다. 우리의 움직임은 단순히 신경 명령과 근·골격(musculoskeletal)의 연결에 의해서만 좌우되지 않는다. 인간의 몸은 매우 활기찬 대상으로 다른 효과기를 포함하는 상대성이나 환경에서의 안정성, 지각과 운동 변수 간의 결합 등과 같은 다양한 비선형적 구조를 포함(Kelso 1984; Kugler & Turvey 1987)하기 때문이다. 단순한 힘(force-control)의 인과론적 관계보다는 우리에게 내재된 기본 속성과 우리를 둘러싼 외부 속성의 동적인 협응 관계(coordination dynamics)를 통해 매우 다양하고 복잡한 현상들이 어떤 근본적인 원리에 의해 이루어지는지 관찰해 보고자 한 것이다.

따라서 본 연구는 앞서 제시한 선행 연구의 이론적 배경과 내용들을 바탕으로, 특정 조건에 제한적인 실험적 설계를 벗어나 자발적인 신체 적응력으로서 협응(bimanual coordination)의 구조적 안정성이라는 기본 특성이 24시간 주기와 어떠한 관계에 있는지 조금 더 근본적 차원에서(Aldemir et al., 2000) 알아보고자

하는 데에 목적을 두었다. 나아가서 열역학(thermodynamics) 변인의 측면에서 수행자가 일상적 수준으로 활동하는 동안 체온 증추를 24시간 환경주기와 다르게 조작(forced desynchrony)함으로써, 주기에 따른 열 반응을 효과적으로 설명(Waterhouse et al., 2005) 하고자 하였다.

움직인다는 것은 단순히 증추의 신경신호가 근·골격계를 통해 표출되는 관계를 넘어서 복합적인 상호작용을 통한 지각과 동작의 긴밀한 결합(perception - action coupling) 관계라는 사실을 감안할 때 본 연구 결과와 분석 모형이 주는 잠재성은 의미가 있을 것이다. 복잡한 상호작용 관계를 설명하는 단순하면서도 분명한 도구일 뿐만 아니라 유기체의 창발(emergent) 및 적응(adaptation)을 일으키는 과정(Amazeen, 2002; Latash & Turvey, 1996; Zanone & Kelso, 1997)에서도 새로운 시각을 제공할 수 있기 때문이다. 이렇게 유기체와 환경에 기본적으로 내재되어 있는 비선형 역학 관계를 모형화하고 분석하는 것은 어떤 내·외부적 요인이 우리가 당면한 복잡성(complexity) 또는 기전에서 중요하게 다루어져야 하는지를 경험적으로 검증해 보았다는 측면에서도 충분한 의미가 있을 것으로 사료된다.

연구방법

연구 참여자

본 연구에 참여하는 피험자는 서울대학교와 코네티컷 대학교에 재학 중인 학생(participant pool)으로 실험 과제에 대한 경험이 없고 과제수행에 제한을 줄 수 있는 정형외과적 및 신경학적 질환이 없으며 이전에 관련 질환을 앓은 적이 없는 건강한 성인 24명으로 하였다. 이들 중 무선할당을 통해서 무작위 설계1 그룹(N=8), 설계2 그룹(N=8), 그리고 설계3 그룹(N=8)으로 구분하여 실험을 진행하였다.

실험 기간 동안 각기 다른 24시간 생활에서 발생 가능한 개인차를 최소화하기 위해 수면 시간, 음주, 과로 등 주의 사항이 전달 및 체크되었으며, 피험자의 모집은 지역 연구윤리위원회의 승인(SNUIRB No.1509/002-002, Collaborative Institutional Training Initiative Program, report ID 20481572) 하에 정해진 절차에

따라 실시되었다. 모든 피험자는 실험 참여와 관련된 서면 동의서를 작성한 후 과제에 참여하였다.

자료 수집

실험절차 및 도구

본 연구에서 사용하는 양손 협응(bimanual coordination) 과제는 동일위상(in-phase) 형태로 1분 동안 양손을 움직이는 것이다. 피험자는 의자에 앉아서 과제로써 제시된 위상을 지정된 시간동안 유지해야 하고, 매트 로눔 소리(1.21 second: natural period of the pendulum system)에 맞추어 수행하지만, 가능한 자연적인 상태를 유지하기 위해 양손 진자 운동의 폭(amplitude)과 빈도(frequency)에 대한 제한은 요구되지 않았다.

과제를 수행하는 동안 나무 막대에 부착된 센서(DC potentiometer, Polhemus)가 움직임 분석을 위한 기초 자료를 수집하였으며, 양손 진자 운동의 고유진동속성(eigenfrequency)을 부여하기 위해 200g의 질량을 나무 막대의 하단으로부터 30cm 위에 동일하게 부착하였다(Amazeen, Amazeen, Triffiner, & Turvey, 1997).

각 실험 조건에 요구되는 수행자의 내부 온도 주기와 외부 온도 주기의 기록 및 조절은 각 실험 설계와 장소(2014년 8~10월 University of Connecticut, 2015년 8~10월 Seoul National University)에 적합하게 고안된 온도계(3M BairHugger, Temperature Monitoring System Control Uniteand Sensor), 온도 조절 장치(Heat & Ice chamber, or vest; Krauchi & Wirz-Justice, 2001), 그리고 빛[ambient light intensity (in lux)] 조절 장치 등을 통해 이루어졌다.

통계분석

수집된 자료는 컴퓨터 프로그래밍(Jupyter notebook 4.0)을 통해 분석되었으며, 이를 바탕으로 수행관련 변인에 따른 차이의 검증은 SPSS Version 24 program의 기초(Mean, Standard deviation) 및 추리 통계(t-test: A statistical measurement of T distribution, ANOVA: A statistical measurement of F distribution, Two-way ANOVA: Used when there are two grouping variables) 방법을 통해 이루어졌다. 통계적 유의수준은 $p < .05$ 이다.

자료 분석 및 실험 설계 1

기본 사지 간 협응의 동일위상 끌개(coupling attractor)를 24시간 밤·낮의 온도 주기에서 관찰해 보기 위해서 실험을 진행하였다.

Table 1. Experimental design 1

| Condition | Participants | Circadian points | Trials at each circadian | Task/rest (min) |
|-----------|--------------|------------------|--------------------------|-----------------|
| Normal | 8 | 5:00 | 6 | 1/5 |
| | | 12:00 | | |
| | | 17:00 | | |
| | | 00:00 | | |

Data collection for the experiment 1.

Table 1은 전형적인 역동적 대칭 협응 패러다임 측면에서 대칭적인 사지 분절 간의 위상적 동시 협응의 구조적 안정성이 시간에 따라 변화하는 위상적 변화로 파악될 수 있는지에 대한 첫 번째 실험 설계를 제시하고 있다. 양손 진자 움직임의 수행 정보를 24시간 온도 주기의 변화가 가장 두드러지게 관찰되는 것으로 잘 알려진 4시점(Aschoff, 1983)에서 수집하였다.

본 연구 설계의 특성 상 발생할 수 있을 것으로 사료된 피로 효과(fatigue effect)를 통제하기 위해 휴식시간을(rest time) 매 시행 간 적용하였다. 반복 수행(Trials at each circadian)으로 인해 발생할 수 있는 학습 효과(learning effect)를 통제하기 위해 각 어깨, 팔꿈치, 손목 관절의 자료를 매번 무작위한 방법으로 수집하되, 대표성을 가장 잘 반영하고 있는 것으로 관찰된 손목 자료 수집의 결과 값만을 주요 결과 분석 자료로 사용하였다($F(2, 47) = 4656.999, = 8.077 (p < 0.001)$). 그 이유는 사전 실험 자료 분석 결과(pilot test) 하나의 관절에서만 반복 수행을 한 집단에서는 시행 수 증가에 따른 학습 효과가 관찰된 반면[Pearson Correlation $R = -.284 (p < 0.025)$], 세 개의 관절(어깨, 팔꿈치, 손목)에서 무작위한 방법으로 수행을 반복한 집단에서는 학습 효과가 작용하지 않는 것으로 관찰[Pearson Correlation $R = .110 (p < 0.236)$] 되었기 때문이다.

자료 분석 모형 1

실험 설계 1의 분석을 위한 모형은 서론에서 언급한 비선형역학의 끌개로부터 적용되었다. 시·공간상에서

스프링에 달려있는 물체는 얼마나 당겼는지 시작 상태에 따라 다양한 경로와 궤적을 가질 수 있다. 하지만 모두 “정지한다”는 한 상태로 수렴되는데, 이는 곧 그 체계가 선호하는 상태라는 불변적인 끌개 역학을 통해서 일관적으로 기술된다(Saltzman, 1986). 스프링의 팽팽한 정도($k = \text{stiffness}$)와 달려있는 물체의 질량($m = \text{mass}$), 물체가 접촉하고 있는 지면과의 마찰($b = \text{friction}$)이 다르지 않게 설정된 상황이라면, 스프링에 달린 물체는 당김으로써 생성된 에너지가 진자(oscillation) 운동하는 과정에서 소멸되기 때문에 그 운동의 폭이 점차 줄어들게(damping) 되는 것이다.

$$f(t) = m\ddot{\chi} + b\dot{\chi} + k\chi \quad (1.1)$$

$$m\ddot{\chi} + b\dot{\chi} + k\chi = 0 \quad (1.2)$$

왜냐하면 체계는 에너지 효율성의 측면에서 가변성이 최소한으로 나타나는 쪽(static equilibrium point)으로 안정성을 유지하려하기 때문이다(Kugler & Turvey, 1987).

1985년 Haken, Kelso, & Bunz는 앞서 다루어진 불변적 역학 특성과 같은 체계의 선호 상태를 기반으로 사지 간 협응에 관한 모형을 제시했다(Fig. 2).

물리적 체계에서만뿐만 아니라, 운동학적 근육과 관절 변이의 측면에서 우리의 규칙적인 이행(locomotion)이나 사지의 진자(limb oscillation) 협응을 설명하는 기초(Kay, Kelso, Saltzman, & Schoner, 1987)로써, 기본 사지 간 협응(elementary interlimb coordination)은 상대적인 두 사지의 위상각이 같거나($\theta_2 - \theta_1 \approx 0 \text{ deg}$) 완전히 반대일 때($\theta_2 - \theta_1 \approx \pi \text{ deg}$) 안정적이며, 나아가 두 형 중에서도 같은 위상($\theta_2 - \theta_1 \approx 0 \text{ deg}$)을 더 선호한다는 것이다(이러한 이유로 본 연구의 수행변수로 같은 위상을 택함).

$$\dot{\phi} = -\phi\delta\omega - a\cos(\phi) - b\cos(2\phi) \quad (2)$$

공식(2)은 인간의 기본 사지 간 협응 과정에서 나타나는 상대위상의 불변적인 역학 특성을 표현(attractor landscape of the potential function)하고 있다. 등식에서 ϕ 은 진자 운동하는 각 사지(individual limb oscillator)의 위상각(phase angle)이며, $-\phi\delta\omega$ 은 각

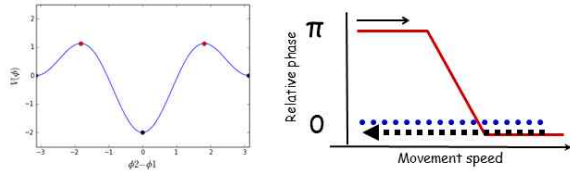


Fig. 2. Reflection of a potential function (HKB model). The plot on the left denotes the intrinsic dynamics of the potential function $[V(\phi)]$, and the black balls symbolize stable states (attractors) and red balls correspond to unstable states (repellers), $\phi_2 - \phi_1 \approx 0$ denotes a condition of nearly synchronized in-phase, and $\phi_2 - \phi_1 \approx \pi$ ($= 3.14, -3.14$) indicates this in an anti-phase. The plot on the right represents the observed relative phase or phase relation between two oscillators at $\phi \approx 0$ deg (in-phase), or $\phi \approx \pm 3.14$ deg (anti-phase = π). The movement speed denotes control parameter and the arrow indicates attractor.

진자의 고유진동수의 차이, a 와 b 은 진자 운동하는 두 사지 간의 계수로 결합(coupling)의 강도를 의미한다. 이 공식은 상대적인 결합강도를 의미하는 두 계수의 비율(b/a)에 따른 상대위상의 불변적인 내재 가능성과, 상대위상(relative phase = ϕ)이 두 사지 간 위상(phase angle) 차이에 의해 결정된다는 안정성의 “점 끌개”를 묘사하고 있다.

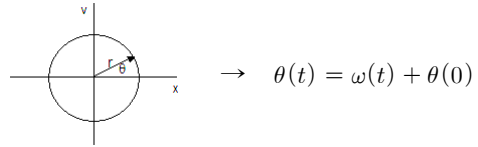
위의 모형을 바탕으로 실제 진자 운동에 대한 상대적인 위상 역학을 아래와 같이 간단하게 계산할 수 있다.

$$\phi = \theta_L - \theta_R \quad (3)$$

여기서, ϕ 은 상대적인(contralateral) 한 사지의 진자 운동($\theta_L =$ 왼쪽)과 다른 사지의 진자 운동($\theta_R =$ 오른쪽)의 위상 강도를 의미한다. 두 사지의 상대적인 위상각도 차이($\theta_L - \theta_R$)에 따라 상대위상(ϕ)은 다양하게 나타날 것이다($\phi = 0^\circ \sim 180^\circ$). 이를 양적으로 표시하기 위해 진자 운동하는 각 사지의 위상을(θ) 각도 계산 방식에 적용($\theta_1 = \omega_1 - \frac{a}{2} \sin(\theta_1 - \theta_2)$)하면 상대위상은 조금 더 간단하게 기술될 수 있다.

$$\theta_1 - \theta_2 = \phi \quad (4)$$

그리고 위상각 1(θ_1)과 위상각 2(θ_2)의 상대적인 위상각(ϕ)을 구하기 위해 아래의 절차를 따라가 보면;



가상의 시공간 상에서, r 을 0이라는 상수(constant)로 간주하고, 시간에 따른 사지의 위상각도(θ)는 양적인 어떤 값(ω)으로 표현 될 수 있는 변수(parameter)라 하자. 위의 정의를 기준으로 한 사지의 진자 운동이 시작된 지점에서($\theta_1(0)$) 시간에 따른 사지의 위상각($\omega_1(t)$)을 더하면 그 사지의 위상각을 정량화 할 수 있고, 다른 사지 역시(θ_2) 동일한 방식($\omega_2(t) + \theta_2(0)$)으로 그 위상각을 계산할 수 있다.

$$\phi = \omega_2 - \omega_1 = \Delta\omega(t) + \phi(0) = \phi(t) \quad (5)$$

이렇게 각도(θ)로 계산된 시간(t)에 따른 각 사지(ω_1, ω_2)의 차이 값($\Delta\omega$)은 진자 운동하는 상대적인 두 사지의 위상 값($\phi(t)$)이 된다. 이 논리를 바탕으로 실제 자료를 수집한 값을 아래의 구별된 상대위상(discrete relative phase) 공식에 대입하면,

$$\phi_j = 2\pi \frac{t_{\max} L_j - t_{\max} R_j}{t_{\max} L_{j+1} - t_{\max} L_j} \quad (6)$$

연속적인 3차원으로 진자 운동하는 두 사지(L, R)의 상대위상 값(Fig. 3, 왼쪽)을 단순한 지점(fixed points)의 값(Fig. 3, 오른쪽)으로 볼 수 있다.

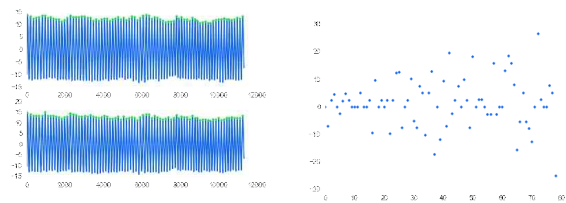


Fig. 3. Graphical representation of the data analysis 1. The plot on the left denotes the frequency range of the amplitude (horizontal axis = time series and vertical axis = displacement, with the upper figure denoting the left-hand side and the bottom denoting the right-hand side). The plot on the right illustrates the discrete relative phase synchrony (horizontal axis = time series, vertical axis = relative phase checked peaks).

자료 분석 및 실험 설계 2, 3

1차 자료 분석 결과를 바탕으로, 유사한 주기로 순환하고 있는 유기체와 환경의 24시간 밤·낮의 온도 주기를 인위적으로 깨뜨렸을 경우 어떠한 적응을 이루어내는지 알아보기 위해서 실험을 진행하였다.

Table 2. Experimental design 2

| Condition | Participants | Circadian points | Trials at each circadian | Task/rest (min) |
|-----------------|--------------|------------------|--------------------------|-----------------|
| Normal | 8 | 5:00 17:00 | 6 | 1/5 |
| Abnormal (heat) | 8 | 5:00 17:00 | 6 | 1/5 |

Data collection for the experiment 2.

Table 3. Experimental design 3

| Condition | Participants | Circadian points | Trials at each circadian | Task/rest (min) |
|----------------|--------------|------------------|--------------------------|-----------------|
| Normal | 8 | 5:00 17:00 | 6 | 1/5 |
| Abnormal (ice) | 8 | 5:00 17:00 | 6 | 1/5 |

Data collection for the experiment 3.

설계 2, 3의 인위적인 체내 온도 변화 효과를 알아보기 위해, 일반적인 조건에서 앞의 실험과 동일한 방법으로 자료를 수집하였다(설계 1, Table 1 설명 참조). 선행 연구의 고찰을 통해 우리 생체의 24시간 온도 주기가 가장 낮은 오전 (약)5시와, 가장 높은 오후 (약)5시에 (Aschoff, 1983; Maury et al., 2010) 실험을 진행하였으며, 섭동을 일으키기 위해 일상적이지 않은 조건 실험 데이터 수집 전 30분 동안 열(냉) 조끼를 착용하고, 제거 후 30분 동안 앞의 실험과 같은 요령으로 자료를 수집하였다(Fig. 4).

이는 상호 주기적인 체계의 구조가 깨졌을 경우 이루어내는 그 자체로서의 지능을 추정해보기 위한 측면이다. 즉, 두 체계(유기체와 환경)의 상대적인 위상 패턴이나 상관관계가 시간이 지남에 따라 처음으로부터 얼마나 그 안정성의 주기를 변화하였는지 파악할 수 있다면, 분석 대상(parameters)의 속성이 환경 조건이나 과제

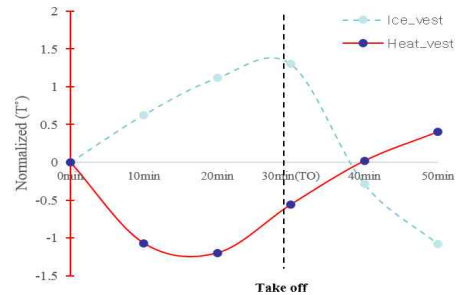


Figure 4. Illustration of the temperature according to the experimental design. The horizontal axis denotes the temperature check time (TO = take off the ice/heat vest under the perturbation condition). The vertical axis is the level of the temperature change as normalized calculation.

요구에 따라 얼마나 다양한 상태 또는 끌개(multiple attractors)를 포함하고 있는지를 알아본 것이다.

자료 분석 모형 2, 3

협응 역학 모형은 사지뿐만 아니라, 다관절, 외부 자극, 그리고 사람 간의 관계 등 다양한 조건에서 우리에게 내재되어 있는 협응과 협응 전이 특성을 설명하기 위해 기본 개념을 적용 및 확대할 수 있다. 우리의 운동 다양성은 신체의 구조 및 기능에 따라 그 대칭(symmetry)이 자발적 또는 외부적 유도에 의해 깨진다. 특히, 일상생활에서 발생하는 사지의 이행패턴(뻗기, 잡기, 비틀기, 또는 조작하기 등)은 협응 역학에서 유도된 대칭성이 공간적 또는 시간적으로 깨진(symmetry breaking) 형태라는 것을 고려하는 것이다. 이 적용은, Haken et al., (1985)의 기본 사지 간 모형에서 각 진자의 고유진동수의 차이 [$\Delta\omega = (\omega_L - \omega_R)$]를 조장(symmetry breaking through frequency competition)함으로써 가능하다(Amazeen et al., 1997).

그리고 조금 더 정교한 측면에서 두 진자체의 결합 강도(b/a)나 고유진동수($\Delta\omega$)의 조장 없이, 협응에 내재되어 있는 또 다른 기능적 비대칭성(asymmetry: 선호성, 주의, 진자의 회전 축)을 조장(symmetry breaking through asymmetry coupling)하는 방식으로도 확대하여 적용할 수 있다.

$$\phi' = \Delta\omega - [a \cos(\phi) + b \cos(2\phi)] - [c \cos(\phi) + d \cos(2\phi)] + \sqrt{\rho \xi_t} \quad (7)$$

위 공식에서 ϕ' 은 상대 위상의 변화, $\Delta\omega$ 은 각 사지의 고유진동수(eigenfrequency) 조장을 통한 대칭 깨짐, $[a\cos(\phi) + b\cos(2\phi)]$ 은 진자 운동하는 두 사지 간의 결합의 강도로 각 사지의 고유진동수와 함께 두 사지의 위상 차이가 0 또는 π 에서 정의된 대칭 협응 끌개이다. $[c\sin(\phi) + 2d\sin(2\phi)]$ 은 기본 사지 협응 체계에 의도적으로 추가된 비대칭성 협응 끌개(asymmetric coupling attractor)이며 $\sqrt{\rho\xi_t}$ 은 잡음(ρ 의 강도를 갖는 Gaussian white noise)을 의미한다(Treffner & Turvey, 1996).

구체적으로, 24시간 밤·낮의 온도 주기에 따른 기본적인 생체 협응의 구조적 안정성을 각기 다르게 순환하고 있는 개인의 24시간 주기(i.e., morning type vs. evening type)에 따라 관찰 및 비교해보기 위해서 확장된 공식 7로 정의할 수 있는 기본 사지 협응 체계에 알아보고자 하는 변수를 정의하고

c = preferred rhythmic frequency of one,

d = preferred rhythmic frequency of the other

구조적으로 다르게 결합하는 c (24시간 온도 순환 주기)와 d (각 개인의 온도 순환 주기)속성의 강도를 관찰(symmetry breaking through d/c)하면 상태에 따른 차이를 정량화할 수 있다.

위와 같은 역동적 체계의 분석을 통하면 기본적인 정보 $\{[\phi_{ave} - \phi_0(rad)], [SD\phi(rad)], \text{and (coefficient of variation)}\}$ 를 바탕으로 시간이 지남에 따라 달라지는 비선형적 안정성의 정도를 반복적인 두 사지의 상대적인 위상 패턴이나 상관관계가 처음으로부터 얼마나 변화하였는지를 추정할 수 있다. 먼저 공식 7로 정의할 수 있는 기본 사지 협응 체계에 미세하게 비대칭적인 변수를 본 연구 설계에 적용하여 d 를 “유기체의 온도순환리듬”, c 를 “환경의 온도순환리듬”라고 조작적으로 정의하고,

c = preferred rhythmic temperature frequency of one,

d = preferred rhythmic temperature frequency of the other

두 체계의 온도 순환주기를 의도적으로 깨뜨렸을 때와 깨뜨리지 않았을 때에

$$|c \text{ and } d| > 0, |c \text{ and } d| \approx 0$$

아래와 같은 공식으로 전개될 수 있는 상대적인 위상 차이를

$$\phi' = \Delta\omega - [a\cos(\phi) + b\cos(2\phi)] - [c\cos(\phi^c) + d\cos(2\phi^c)] + \sqrt{\rho\xi_t} \quad (8)$$

시간이 지남에 따라 달라지는 비선형적 안정성의 정도로써 알아보았다. 여기서 공식 8은 앞서 공식 7에서 정의한 바와 같이 기본 사지 협응 체계에 본 실험에서 의도적으로 추가된 비대칭성 협응 끌개(asymmetric coupling attractor: circadian temperature cycles between two preferred oscillators)로써 기능적으로 미세하게 비대칭적인 잠재성 $[c\cos(\phi^c) + d\cos(2\phi^c)]$ 의 적용을 반영하고 있다.

유기체와 환경의 24시간 밤·낮의 온도 주기를 인위적으로 깨뜨렸을 경우, 시계열 상에서 반복적인 두 사지의 상대적인 위상 패턴이나 상관관계가 처음으로부터 얼마나 변화하였는지는, 분석하는 대상 하나하나가 대표적인 평균으로부터 얼마나 떨어져 있는지를 대변하는 선형적 가변성과 조금 다르게, 분석 대상이 내포하고 있는 발생 확률(p_i)에 대한 경우의 수에 대한 기댓값 $[\log_2(1/p_i)]$ 으로써 체계의 불확실성(Entropy function)을 반영할 것이다.

$$Entropy = \sum_{i=1}^n p_i \times \log_2\left(\frac{1}{p_i}\right) \quad (9)$$

이를 바탕으로 분석 대상(variables)의 속성이 환경 조건이나 과제 요구에 따라 얼마나 다양한 상태(Fig. 5)를 포함하고 있는지를 관찰하였다.

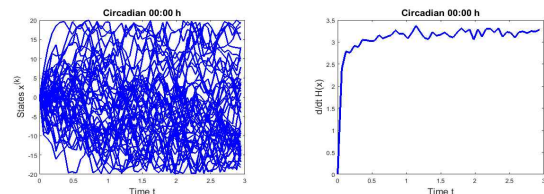


Fig. 5. Graphical representation of the data analysis 2 and 3. The plot on the left denotes the estimated entropy states (vertical axis) according to the time series (horizontal axis), corresponding entropy forces (plot on the right).

연구결과

본 연구는 환경적 맥락에 내재된 유기체의 기본적 특징과 그 역학관계를 관찰하는데 목적을 두었다. 이를 위해 우리에게 내재된 기본 속성(elementary property)이 우리를 둘러싼 외부 속성(environmental property)과 어떤 관계를 이루어내는지 관찰한 것이다. 이는 환경과 유기체의 대칭이 기본적으로 내재된 움직임 협응의 어떠한 자발적 적응 특성을 불러일으키는지 관찰함으로써 물리적 지능 작용에 대한 생물학적 모형을 추정하고자 한 것이라 할 수 있다.

결과 1

신체적 지능의 자발적 잠재성을 관찰하기 위해 24시간 온도 순환 주기에 내재된 생물학적 순환 주기를 주요한 변인으로, 대칭적인 사지 분절 간의 위상적 동시 협응 리듬의 구조적 안정성은 24시간 온도 순환 주기를 유사하게 따르고 있는 것으로 나타났다.

Table 4. Experimental result 1

| | Circadian 5:00 | | Circadian 12:00 | | Circadian 17:00 | | Circadian 00:00 | |
|-------|----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|
| | ϕ_{ave} | $SD\phi$ | ϕ_{ave} | $SD\phi$ | ϕ_{ave} | $SD\phi$ | ϕ_{ave} | $SD\phi$ |
| P1 | 1.1 | 6.0 | 0.8 | 5.2 | 1.5 | 6.7 | 6.0 | 43.1 |
| P2 | 4.0 | 43.1 | 2.8 | 10.8 | 5.0 | 6.2 | 3.8 | 16.0 |
| P3 | 11.2 | 6.7 | 4.0 | 6.0 | 1.5 | 5.4 | 3.9 | 7.7 |
| P4 | 2.67 | 77.3 | 1.7 | 83.7 | 6.6 | 10.1 | 7.6 | 6.7 |
| P5 | 6.18 | 40.7 | 3.0 | 13.6 | 2.7 | 11.3 | 4.6 | 20.6 |
| P6 | 1.95 | 38.0 | 5.6 | 59.7 | 5.8 | 33.3 | 4.62 | 41.1 |
| P7 | 3.52 | 40.1 | 4.4 | 20.9 | 0.8 | 6.1 | 3.8 | 55.2 |
| P8 | 4.25 | 17.3 | 5.5 | 40.0 | 1.9 | 35.9 | 7.1 | 44.1 |
| T(C°) | 36.6 | | 36.8 | | 37.0 | | 36.6 | |

Each type of raw value for the normal day-night temperature effects. P denotes the participants, numbered 1 ~ 8. ϕ_{ave} = fixed point shift, $SD\phi$ = variability as a function of the frequency competition. T = core body temperature (Celsius).

피험자는 일반적인 24시간 온도 주기의 각 4 시점에서 양손 협응의 같은 위상 움직임(1 minute 6 trials)을 메트로놈 소리에 맞추어 수행하였다. 실험 동안 체크된 피험자의 체내 온도는 24시간 온도 주기에 따라 Fig. 6의 검은색 선과 같이 관찰되었다. 수행 변수인 양손협응의 상대적 위상과 가변성은 Fig. 6의 파란색 선과 빨간색 선과 같이 관찰되었다. 주목할 부분은 체내의 온도

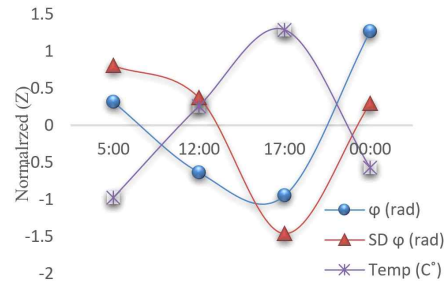


Figure 6. General tendencies in the normal condition. Normalized = standard score (Z calculation), blue line = fixed point shift, red line = variability as a function of the frequency competition, Temp = temperature (Celsius), 5:00, 12:00, 17:00, and 00:00.

와 분석된 수행 변수들이 방향은 다르지만 거의 유사하게 24시간 온도 주기를 따르고 있는 것으로 나타났다 [circadian 5:00 and 17:00 points' variability = $p < 0.060$]]는 것이다.

결과 2, 3

신체적 지능의 자발적 잠재성을 관찰하기 위해 24시간 온도 순환 주기에 내재된 생물학적 순환 주기를 주요한 변인으로, 인위적인 24시간 온도 주기 깨짐에 따른 기본 사지 간 협응 체계의 자발적 적응성을 추정하였다.

Table 5. Experimental result 2

| | Circadian N 5:00 | Circadian N 17:00 | Circadian Ab 5:00 | Circadian Ab 17:00 |
|----------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| N(I) | 8 | 8 | 8 | 8 |
| AVER(H) | 0.410 | -0.165 | 0.564 | -0.809 |
| STDEV(H) | 0.651 | 0.664 | 0.627 | 0.745 |
| SES | 0.230 | 0.235 | 0.222 | 0.264 |

Averaged entropy production from normal and abnormal (heat based) day-night temperature effects. N(I) = number of case indexed by the calculation of (trail1 + trail2 / 2), AVER = averaged entropy(H) production; STDEV = averaged variability from the entropy(H) production; SES = standard error score.

Table 6. Experimental result 3

| | Circadian N 5:00 | Circadian N 17:00 | Circadian Ab 5:00 | Circadian Ab 17:00 |
|----------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| N(I) | 8 | 8 | 8 | 8 |
| AVER(H) | 0.404 | -0.172 | 0.608 | -0.840 |
| STDEV(H) | 0.446 | 1.031 | 0.518 | 0.993 |
| SES | 0.158 | 0.365 | 0.183 | 0.351 |

Averaged entropy production from normal and abnormal (ice based) day-night temperature effects.

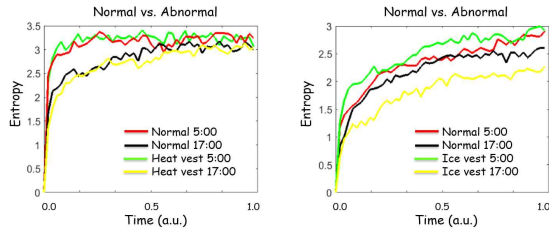


Fig. 7. Entropy forces. The plot on the left denotes the entropy forces of the heat-based normal vs. abnormal conditions, which data was from the results 2. The plot on the right denotes the entropy forces of the ice-based normal vs. abnormal conditions, which data was from the results 3.

시스템의 안정성을 분석한 결과, 일반적인 조건에서는 역시 거의 유사하게 24시간 온도 주기를 따르고 있는 것으로 나타났다. 인위적으로 체내 온도를 증가시켰을 경우(Fig. 7, 왼쪽), 역시 24시간 온도 주기 효과를 따르고 있었다. 그러나 세부적으로 새벽 5시에 양손 협응의 안정성은 일반적인 조건보다 떨어진 반면, 오후 5시에는 일반적인 조건보다 증가되었다. 일반적인 조건과 인위적으로 체내 온도를 저하시킨 경우(Fig. 7, 오른쪽)에서도 유사한 조건에 따른 상호작용 효과가 관찰되었다. 일반적인 조건에서 나타난 생체 안정성은 역시 24시간 온도 주기를 따르고 있는 것으로 나타났다. 그러나 인위적으로 체내 온도를 저하시켰을 경우 전반적으로 24시간 주기를 따르고 있었지만, 새벽 5시에 양손 협응의 안정성은 일반적인 조건보다 저하된 반면, 오후 5시에는 일반적인 조건보다 증가되었다.

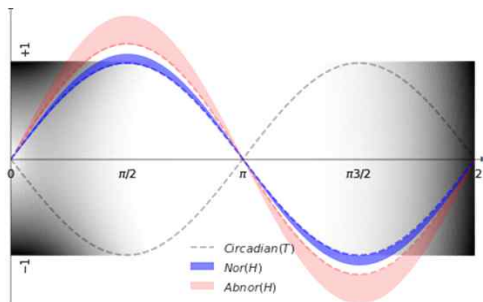


Fig. 8. Illustration of the three-different experimental results. The contour (black ~ white) represents the 24 hour circadian process (T = temperature, H = entropy) as expressed by a sine function ($\pi/2 = 5:00$, $\pi = 12:00$, $3\pi/2 = 17:00$, $2\pi = 00:00$) according to the optimized value of the system's state with arbitrary units of -1 to 1.

실험 1, 2, 3의 결과를 종합적으로 묘사하고 있는 Fig. 8의 파란색 부분은 우리의 내적 특질을 잘 대변해 온 양손협응 수행력이 대표적인 외적 특질의 하나인 하루의 온도 주기와 어떠한 관계를 갖고 있는지 보여주고 있다[Nor(H)]. Fig. 8의 붉은색 부분은 우리가 이루어내는 자체 지능으로써 환경 체계와 유사한 주기로 순환하는 우리 체계의 구조를 의도적으로 깨뜨렸을 경우 어떻게 적응을 하고 있는지 보여주고 있다[Abnor(H)]. 우리는 우리를 둘러싼 환경에 영향을 받고 있지만, 인위적으로 이를 섭동시켰을 경우, 적응하는 방식은 24시간 주기에 가변적이었다. 다른 환경 조건일지라도 관찰된 생체 안정성은 전반적으로 24시간 온도 주기를 따르고 있는 것으로 나타났지만(circadian = $p < 0.001$), 인위적으로 체내 온도를 섭동시킨 경우에는, 조건에 따른 상호작용 효과(interaction = $p < 0.043$)가 나타났기 때문이다. 이는 생태학적 수준에서 유기체의 근본적 특질(intact bimanual coordination)이 과제로서 적절하거나 부적절한 환경적 구조(circadian temperature cycle)화에 의해 어떤 현상을 이루어내는지 나타내고 있는 것이라 할 수 있을 것이다.

논 의

지각과 동작의 연속성(Gibson, 1950)이라는 개념이 다루어지면서부터 이어져 온 행동적 적응은 환경적 특질에 결합하는 자연적 법칙 때문인 것으로 이해 할 수 있는데, 특히 지능을 유기체와 환경 모두를 포함하는 분석단위인 물리적 특성으로 인정하는 것에 초점을 맞춘다. 그러나 이러한 물리적 지능에 연관되어 있는 현상들은 그 위치와 근원 정보들이 너무나 가변적이다. 그러면 어떻게 이 지능의 문제를 중추 신경 지배체계가 아닌 유기체가 스스로 가지는 물리적 특질로 표명할 수 있을까? 자연 과학과 환경적 직접 작용 접근의 바탕을 두고 연관된 신체적 지능의 자발적 잠재성을 찾기 위해서 두 가지 개념을 연관시키고자 하였다.

첫째, 밤과 낮의 순환에 내재된 근본적 환경 차원의 온도 주기이다. 왜냐하면 밤과 낮의 온도 주기는 약 24시간을 기준으로 순환 하는데, 우리의 인지 수행 능력 또한 중심부의 체온조절중추(suprachiasmatic nuclei:

SCN) 때문에 밤과 낮의 24시간 온도 주기를 거의 유사하게 따르고 있기(Aschoff, 1983) 때문이다. 둘째, 자발적인 신체 능력 적응력으로서 기본적인 양손 협응(elementary bimanual coordination)의 구조적 안정성이다. 왜냐하면 인용수가 높은 저널 및 저서에서는 우리가 다른 유기체와 구별되는 몇 가지 특질 중 가장 큰 가치를 움직임(movement)으로 꼽는다. 특히, 원시 때부터 생존과 관련된 이행(locomotion)은 우리뿐 아니라 다른 유기체에게도 적용되는 것으로, 동시성을 갖는 시간에 따른 사지의 협응(limbs synchrony)은 매우 뿌리 깊은 원리이자 집합적 수준의 법칙(Kugler, Kelso, & Turvey, 1980)이기 때문이다.

연구를 진행하면서 몇 가지 제한(다른 계절, 개인차 통제, 더 많은 시간대의 측정, 섭동의 타당성, 정밀한 신경 화학적 자료 수집 등) 사항이 발견되었지만, 실험적 설계의 타당성과 신뢰성이 보존되는 범위에서 자료를 수집하고 분석한 결과 우리 체계는 24시간 온도 주기 체계를 거의 유사하게 따르고 있었다. 흥미로운 것은 섭동되었을 경우, 적응 하는 방식이 24시간 온도 주기에 가변적으로 나타났다는 것이다.

먼저, 본 연구 결과는 하루의 온도 주기와 정적(positive) 또는 부적(negative) 상관을 보이는 기전을 일반화 할 수 있는 근거가 될 수 있을 것으로 생각한다. 앞에서 언급한 바와 같이 우리의 생체 주기는 일반적으로 24시간 온도 주기를 따르고 있지만, 조금 더 구체적으로 최대 운동 수행 능력(Thun, Bjorvatn, Flo, Harris, & Pallesen, 2015)에서부터 호르몬 분비(Marcheva et al., 2010)에 이르기까지 24시간 주기와 관련된 많은 연구들은 과제의 특성에 따라 다르게 나타나는 24시간 주기 효과를 보고하고 있다. 개인차(morningness, eveningness), 피로(jet leg), 연령(age) 등과 같은 수행자의 다양한 가변 요소들 또한 주의 깊게 다루어야 한다고 강조하고 있다(Borbély & Achermann, 1999; Goldstein, Hahn, Hasher, Wiprzycka, & Zelazo, 2007; Waterhouse et al., 2005). 수면 시간 단축과 같은 의도적인 중재를 하지 않는 한, 이른 아침(before 10 AM) 우리의 생체 리듬과 인지-행동 수행 능력(working memory & mental arithmetic performance)은 제대로 작동하지 못한다고 강조(Blake, 1967) 하는 반면, 일부는 수행과 학습의 이른 아침 효과를 주장하기도 한다(Baron & Reid,

2014). 분명해 보이는 것은 하루의 온도 주기와 정적 또는 부적 상관을 보이는(Carrier & Monk, 2000; Monk et al., 1983) 기전을 일반화하기에는 과제와 수행자의 특성, 그리고 이를 둘러싼 환경적 변인(different effect in circadian rhythm)의 이질(methodological heterogeneity)적인 부분이 많이 남아있다는 유사한 제안을 남기고 있다는 것이다(Edholm, Fox, & Wolf, 1973; Walther et al., 2002; Thun et al., 2015). 본 연구의 결과는 사전 연구들이 남기고 있는 이러한 과제와 수행자의 특성, 그리고 이를 둘러싼 환경적 변인의 이질적인 부분이 왜 많이 남아있는지에 대한 하나의 경험적 추측이 될 수 있을 것이다.

다음으로, 본 연구의 결과는 협응 분석의 측면에서 그 기전과 원리가 특징적 사건과 관계하여 전체적인 에너지 흐름의 변화(Kugler et al., 1980)를 잘 반영하고 있는 것으로 보인다. 단순히 위치(χ)나 속도(χ') 등의 정적 상태의 변화이기보다, 자기 반복적 규칙(recursion rule)을 수반하는 체계에 부호화된 결과(Rosen, 1991)로 해석된다는 것이다.

$$(\chi_0, \chi'_0) \rightarrow (\chi_0 + \chi'_0 dt, \chi'_0 + F dt) \quad (10)$$

다시 말해, 일반적으로 환경의 주기를 따르고 있지만, 인위적으로 섭동이 되었을 경우 적응하는 방식이 다르게 관찰되었다는 것은 단순히 체계의 상태가 어느 위치에서 다른 위치(χ_0, χ'_0)로 옮겨졌다기보다, 하나의 위상을 가능하게 하는 제한된 장(constraint)에서 하나의 위상으로부터 다른 위상으로($\chi_0 + \chi'_0 dt, \chi'_0 + F dt$) 적응(Bohm, 1969)을 일으킨 기본 협응 체계의 자발적 적응이라 할 수 있을 것이다. 이는 인지-행동의 질적인 변화이며, 특히나 생물체 행위의 변수와 안정적 특성을 보여주고 있다는 측면에서 중요한 의미를 둘 수 있을 것으로 사료된다.

마지막으로 열역학에 의하면, 체계의 상태는 에너지와 열의 관계에 의해 정의될 수 있다. 이에 따르면 체계는 온도 변화에 의해 결정되는데, 이 단순한 열역학 법칙에 빚어 24시간 온도 주기를 불변적으로 따르고 있는 생체 안정성은 설명될 수 있을 것이다(Clausius, 1867). 왜냐하면 일반적인 조건에서 우리의 안정성은 온도 변수에 의해 좌우되었기 때문이다. 하지만 이 체계가 섭동 되었을 경우 적응 하는 방식은 조건에 따라 달라지는(context dependency) 부등식(Bell, 1964)의

개념으로 설명되어져야 할 것으로 추정한다. 왜냐하면 체계의 상태는 에너지 흐름의 상대적인 비율이 얼마나 다른가에 따라 달라질 수도 있기 때문이다(Harrison, 1981). 우리가 당면하고 있는 운동은 단순하지 않다. 운동한다는 것은 다차원적인 내·외적 힘의 상호작용 관계(Bernstein, 1967)뿐만 아니라 물리적 역동 체계가 다양한 맥락에 대응(Strogatz, 1994)하고 있는 것이다. 이러한 기본 열역학적 논의 과정을 통해 이야기하고자 하는 바는 환경적 맥락에 묻힌 우리 운동체계는 보다 복잡하고 많은 자유도를 가질 수 있다(Von Neumann, 1951)는 제안이다. 그리고 그 자유도 또는 복잡성은 단순히 하나의 요소에 의하기 보다는 그 현상에 묻혀있는 내·외적 상호작용 관계의 과정에서 이루어지는 결과로 해석되어야 할 것이다(Rosen, 1987).

결론 및 제언

수많은 요소들이 유기적으로 작용하고 있는 복잡한 것을 다룰 수 있는 방법은 뜻밖에도 아주 단순한 것에 기반하고 있을 수 있다(Iberall & Soodak, 1987). 이는 복잡한 생태계에 속한 유기체의 긴밀한 움직임을 바탕으로 핵심적인 정보를 찾고, 제공해야 하는 우리가 분명히 관심을 기울여야 하는 부분이다. 생태학적 방법론을 적용하여 유기체의 근원적 기전을 규명하고자 했던 본 접근은 스포츠과학 분야에서 새로운 연구 주제로서의 가치를 가질 수 있다고 생각한다. 이는 '움직임 협응'이라는 고전적 연구 주제를 보다 종합적인 관점에서 이해할 수 있도록 연구 영역을 확장하는 가치를 포함하고 있기도 할 것이다. 나아가서 이렇게 내·외적 체계의 상호작용 관점에서 유기체의 행동을 이해하려 하는 것은, 과학 분야에서 최근 주목받고 있는 학제 간 통합 및 협력 연구를 유도할 수 있는 구심점으로서의 가치를 가질 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- Aldemir, H., Atkinson, G., Cable, T., Edwards, B., Waterhouse, J., & Reilly, T. (2000). A comparison of the immediate effects of moderate exercise in the early morning and late afternoon on core temperature and cutaneous thermoregulatory mechanisms. *Chronobiology international*, 17(2), 197-207.
- Amazeen, P. G. (2002). Is dynamics the content of a generalized motor program for rhythmic interlimb coordination?. *Journal of motor behavior*, 34(3), 233-251.
- Amazeen, E. L., Amazeen, P. G., Treffner, P. J., & Turvey, M. T. (1997). Attention and handedness in bimanual coordination dynamics. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(5), 1552.
- Aschoff, J. (1983). Circadian control of body temperature. *Journal of Thermal Biology*, 8, 143-147.
- Baron, K. G., & Reid, K. J. (2014). Circadian misalignment and health. *International Review of Psychiatry*, 26(2), 139-154.
- Bell, J. S. (1964). On the einstein-podolsky-rosen paradox. *Physics*, 1(3), 195-200.
- Bernstein, N. A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. Oxford: Pergamon Press.
- Blake, M. J. F. (1967). Time of day effects on performance in a range of tasks. *Psychonomic science*, 9(6), 349-350.
- Bohm, D. (1969). Some remarks on the notion of order. In C. H. Waddington (Ed.), *Towards a theoretical biology, Volume 2* (pp. 18-40). Chicago: Aldine Publishing Company.
- Borbély, A. A., & Achermann, P. (1999). Sleep homeostasis and models of sleep regulation. *Journal of biological rhythms*, 14(6), 559-570.
- Cariani, P. (1993). To evolve an ear. Epistemological implications of gordon pask's electrochemical devices. *Systems research*, 10(3), 19-33.
- Carrier, J., & Monk, T. H. (2000). Circadian rhythms of performance: new trends. *Chronobiology international*, 17(6), 719-732.
- Clausius, R. (1867). On Different Forms of the Fundamental Equations of the Mechanical Theory of Heat and their Convenience for Application. *The Second Law of Thermodynamics*, edited by J. Kestin, Dowden, Hutchinson and Ross, 162-193.
- Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). (2009). *Physical intelligence. Defense Sciences Office, BAA-09-63*, 1 - 38.
- Edholm, O. G., Fox, R. H., & Wolf, H. S. (1973). Body

- temperature during exercise and rest in cold and hot climates. *Archives des sciences physiologiques*, 27(3), 339.
- Ford, B. J. (2008). Microscopical substantiation of intelligence in living cells. *Infocus Magazine*, (12), 4.
- Goldstein, D., Hahn, C. S., Hasher, L., Wiprzycka, U. J., & Zelazo, P. D. (2007). Time of day, intellectual performance, and behavioral problems in morning versus evening type adolescents: Is there a synchrony effect?. *Personality and Individual Differences*, 42(3), 431-440.
- Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. Riverside Press, Cambridge, England.
- Haken, H., Kelso, J. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological cybernetics*, 51(5), 347-356.
- Harrison, D. (1982). Bell's inequality and quantum correlations. *American Journal of Physics*, 50(9), 811-816.
- Iberall, A. S. (1977). A field and circuit thermodynamics for integrative physiology. I. Introduction to the general notions. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 233(5), R171-R180.
- Iberall, A. S., & Soodak, H. (1987). A physics for complex systems. In *Self-organizing systems* (pp. 499-520). Springer US.
- Johnson, M. P., Duffy, J. F., Dijk, D. J., Ronda, J. M., Dyal, C. M., & Czeisler, C. A. (1992). Short term memory, alertness and performance: a reappraisal of their relationship to body temperature. *Journal of sleep research*, 1(1), 24-29.
- Kay, B. A., Kelso, J. S., Saltzman, E. L., & Schöner, G. (1987). Space-time behavior of single and bimanual rhythmical movements: Data and limit cycle model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(2), 178.
- Kelso, J. A. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 246(6), 1000-1004.
- Krauchi, K., & Wirz-Justice, A. (1994). Circadian rhythm of heat production, heart rate, and skin and core temperature under unmasking conditions in men. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 267(3), 819-829.
- Kräuchi, K., & Wirz-Justice, A. (2001). Circadian clues to sleep onset mechanisms. *Neuropsychopharmacology*, 25, 92-96.
- Kugler, P. N., Kelso, J. S., & Turvey, M. T. (1980). 1 On the Concept of Coordinative Structures as Dissipative Structures: I. *Theoretical Lines of Convergence. Advances in Psychology*, 1, 3-47.
- Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1987). *Information, natural law and the self-assembly of rhythmic movement*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Latash, M. L., Turvey, M. *Texterity and its development..*, & Bernshtein, N. A. (1996). D Lawrence Erlbaum.
- Marcheva, B., Ramsey, K. M., Buhr, E. D., Kobayashi, Y., Su, H., Ko, C. H., ... & Lopez, J. P. (2010). Disruption of the clock components CLOCK and BMAL1 leads to hypoinsulinaemia and diabetes. *Nature*, 466(7306), 627-631.
- Maury, E., Ramsey, K. M., & Bass, J. (2010). Circadian rhythms and metabolic syndrome from experimental genetics to human disease. *Circulation research*, 106(3), 447-462.
- Monk, T. H., Weitzman, E. D., Fookson, J. E., Moline, M. L., Kronauer, R. E., & Gander, P. H. (1983). "Task variables determine which biological clock controls circadian rhythms in human performance." *Nature* 304, 543.
- Reed, E. S. (1996). *Encountering the world: Toward an ecological psychology* (Vol. 1). New York: Oxford University Press.
- Rosen, R. (1987). Some epistemological issues in physics and biology. In B. J. Hilley & F. D. Platt (Eds.), *Quantum implications: Essays in honor of David Bohm* (pp. 315-327). New York: Routledge & Kegan.
- Rosen, R. (1991). *Life itself*. New York: Columbia University Press.
- Saltzman, E. (1986). The task dynamic coordination of the speech articulators: A preliminary model. In H. Heuer and C. Fromm (eds.), *Generation and modeling of action patterns* (pp. 129-144). New York: Springer-Verlag.
- Strogatz, S. H. (1994). *Nonlinear dynamics and chaos*. Reading, MA: Addison-Wiley.
- Strong Jr, D. R., & Ray Jr, T. S. (1975). Host Tree Location Behavior of a Tropical Vine (*Monstera gigantea*) by S kototropism. *Science*, 190, 804-806
- Thun, E., Bjorvatn, B., Flo, E., Harris, A., & Pallesen, S. (2015). Sleep, circadian rhythms, and athletic performance. *Sleep medicine reviews*, 23, 1-9.
- Treffner, P. J., & Turvey, M. T. (1996). Symmetry, broken

- symmetry, and handedness in bimanual coordination dynamics. *Experimental Brain Research*, 107(3), 463-478.
- Turvey, M. T., & Carello, C. (2012). On intelligence from first principles: Guidelines for inquiry into the hypothesis of physical intelligence (PI). *Ecological Psychology*, 24(1), 3-32.
- Turvey, M. T., Shaw, R. E., Reed, E. S., & Mace, W. M. (1981). Ecological laws of perceiving and acting: In reply to Fodor and Pylyshyn (1981). *Cognition*, 9(3), 237-304.
- Von Neumann, J. (1951). The general and logical theory of automata. *Cerebral mechanisms in behavior*, 1-41.
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebe, T. J., ... & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416(6879), 389-395.
- Waterhouse, J., Drust, B., Weinert, D., Edwards, B., Gregson, W., Atkinson, G., ... & Reilly, T. (2005). The circadian rhythm of core temperature: origin and some implications for exercise performance. *Chronobiology international*, 22(2), 207-225.
- Zanone, P. G., & Kelso, J. S. (1997). Coordination dynamics of learning and transfer: collective and component levels. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(5), 1454.

하루의 온도 주기에 따른 기본 운동 대칭성의 동역학적 변화

박철욱(국제 응용 시스템 분석 연구원)

[목적] 본 연구는 환경체계에 내재되어 있는 유기체의 생물학적 자치성과 조절기능을 관찰하는데 목적을 두고 있다. 단순히 유기체라기보다 유기-환경 체계(organism-environment system)라 일컬어지는 직접 행동(directed behavior)의 이해를 위해, 24시간 온도 주기 맥락에서 생물학적 특성을 측정함으로써 신체적 지능의 자발적 잠재성을 추정하고자 하는 것이다. **[방법]** 실험 자료의 수집은 커네티컷 대학교(University of Connecticut, USA)와 서울대학교(Seoul National University, Korea) 24명의 학생 참여로 이루어졌다. 환경 체계에 따른 유기체의 기본(elementary) 특성(운동 대칭성)을 검사하기 위해, 양손 진자(pendulums) 운동의 상대적 위상(relative phase)을 24시간 순환주기에서 측정하여 밤/낮 온도 효과를 비교하였다(설계 1: 정상적인 온도 순환 주기에 따른 안정성 변화(5:00, 12:00, 17:00, 24:00). 설계 2, 3: 24시간 온도 주기에서 일반적인 체내 온도 조건과 인위적으로 섭동(perturbation)된 조건에 따른 변화(설계 2: 인위적인 인체 온도 올림(heat-vest) 자극(일반 5:00, 17:00 대 섭동 5:00, 17:00), 설계 3: 인위적인 인체 온도 내림(ice-vest) 자극(일반 5:00, 17:00 대 섭동 5:00, 17:00))). **[결과]** 협응 측정의 실험적 모형은 종속 변수(생물학적 안정성)가 밤/낮 온도 주기에 따라 다양하게 나타난다는 것을 유의미하게 보여주었다. 온도가 인위적으로 섭동된 협응 운동 안정성의 24시간 주기 효과는 24시간 밤/낮 온도 순환주기에 따라 가변적으로 관찰된 반면, 인위적으로 섭동되지 않은 일반적 주기 조건으로 구분된 협응 운동 안정성의 24시간 주기 효과는 24시간 밤/낮 온도 순환주기에 불변적인 것으로 관찰되었다. **[결론]** 관찰된 생물학적 양상(체온 과 운동 대칭의 안정성)과 환경적 과정(24시간 온도 순환 주기)간의 관계성은, 환경에 적응하는 우리 체계의 유일한 특성을 반영하고 있는 것으로 해석된다. 그리고 우리는 이러한 유기체(X)와 환경(Y)의 역동성을 두 요소의 상호관계 속에서 일어나는 유기-환경 통합(또는 직접) 체계(X-Y)로 간주해야 할 것으로 사료된다.

주요어: 신체지능, 양손협응, 일주율, 열역학, 맥락의존도.