

신경경제학과 정신의학 : 정량적 방법론의 적용

서울여자대학교 경영학과,¹ 용인정신병원 정신건강의학과,² 한양대학교 정신건강연구소³

이 선 애¹ · 박 선 철^{2,3}

Neuroeconomics and Psychiatry : Application of Quantitative Methodology

Sunae Lee, PhD¹ and Seon-Cheol Park, MD, PhD^{2,3}

¹Business Administration, College of Social Science, Seoul Women's University, Seoul, Korea

²Department of Psychiatry, Yong-In Mental Hospital, Yongin, Korea

³Institute of Mental Health, Hanyang University, Seoul, Korea

Neuroeconomics is an interdisciplinary field that seeks to explain human decision making using a combination of research methods from neuroscience, (behavioral) economics, and cognitive and social psychology. With recent advances in functional neuroimaging and computing power, neuroeconomics suggests the possibility of examining psychopathology using a quantitative model based on objective metrics. The purpose of this paper is to introduce the theory of neuroeconomics and to review the literature on its application to psychiatric research. First, the concept of utility function in economic decision theory can be used to explain depressive symptoms with regard to lack of interest in money. Second, differences in attitudes toward uncertainty and risk suggest that avolition and anhedonia can be expected to reduce the influence of uncertainty on decision making. Third, some parametrically varied values of delay discounting show the relation of discounted value to risk of addiction. Finally, economic game theory can provide a model including social factors to address psychiatric conditions ; thus, it provides a useful framework for the current diagnostic classification systems for consideration of interpersonal factors. We expect that conduct of more interdisciplinary research in neuroeconomics and psychiatry will clarify diagnosis and contribute to the description of psychiatric disorders.

J Korean Neuropsychiatr Assoc 2013;52:301-310

KEY WORDS Neuroeconomics · Psychiatric disorder · Utility function · Risk aversion · Game theory.

Received July 28, 2013
Revised August 6, 2013
Accepted August 6, 2013

Address for correspondence

Seon-Cheol Park, MD, PhD
Department of Psychiatry,
Yong-In Mental Hospital,
4 Sangha-dong, Giheung-gu,
Yongin 446-769, Korea
Tel +82-31-288-0203
Fax +82-31-288-0184
E-mail cogito-ergo-sum@hanmail.net

서 론

경제학은 희소한 자원을 활용하여 최선의 방법을 찾는, 즉, 의사결정에 관한 학문이며, 이 때 대전제는 의사결정자가 합리적이라는 것이다. 그러나 현실에서 의사결정자는 항상 합리적인 선택을 하지는 않는다. 이에 1970년대부터 경제학의 대전제가 어긋나는 현상, 즉 사회적, 인지적, 감정적 요소들이 의사결정에 미치는 영향을 연구하는 행동경제학(behavioral economics)이 등장하기도 하였다. 특히, 2000년대 들어 경제학 모형을 뇌과학 및 신경과학적 접근을 통해 설명함으로써 의사결정 과정을 고찰하는 신경경제학(neuroeconomics) 연구가 활발히 진행되었다.¹⁾

신경경제학은 복잡한 대안을 처리하고 활동 과정을 최적화하도록 선택하는 인간의 의사결정 행동(decision-making behavior)을 간학제적인 접근(interdisciplinary approach)으로 고찰한다. 여기에서 간학제적인 접근은 학문적 입장에서 변화를 전제한다는 점에서, 물리적인 수준의 상호작용에 그치

는 다학제적인 접근(multidisciplinary approach)과는 구별된다는 점에 주목해야 한다. 특히, 신경경제학은 이론적인 생물학, 컴퓨터과학 및 수학 등 인접학문과 통합하여 왔으며, 경제적인 행동으로 뇌에 대한 이해를 구체화하고 신경과학적 발견으로 경제학 모형을 설명할 수 있는 방법을 연구한다.²⁾ 특히 경제학에 바탕을 둔 이론적 준거는 학습, 사회적 협력, 뇌 신경전달물질계 등 다양한 연구주제에 적용되고 있다. 구체적인 연구방법론에는 기능적인 자기공명영상(functional magnetic resonance imaging, 이하 fMRI), 양전자방출 단층촬영(positron emission tomography), 경두개 자기자극(transcranial magnetic stimulation) 및 약물학적 중재 등이 포함된다. 즉, 신경경제학은 자극과 반응 간 과정을 이해함으로써 인간 행동에 관한 통합된 이론을 제시하고, 인간의 의사결정 행동에 대한 신경생물학적 기질(neurobiological substrate)을 밝히는 것을 그 목적으로 한다.³⁾

정신질환에 역학, 사회학, 심리학, 약물학, 신경생물학 및 유전학 등의 방법론을 적용함으로써 제공되는 방대한 실증

적인 자료에도 불구하고, 정신질환으로 진단된 개인의 동기적인 힘(motivational force)의 포괄적 설명이 제한적인 것은 개념적인 토대를 아우르는 준거의 결여에 그 원인이 있다.⁴⁾ 신경경제학의 개념 체계는 수식에 근거한 이론적인 예측을 정신의학 연구에서도 폭넓게 도입할 수 있는 가능성을 제시함으로써, 이러한 간격을 메워줄 수 있을 것으로 기대된다. 무엇보다도, 신경경제학을 정신의학에 적용함으로써, 신경영상학 등 인접 학문의 발전을 활용한 정량적 모형을 통한 분석으로 연구 범위를 확장할 수 있고, 과학적 엄밀성을 증대시킬 수 있을 것이다. 구체적으로 첫째, 신경경제학으로부터 파생된 이론적인 예측 모형을 활용하여 정신병리를 평가하기 위한 객관적인 준거를 형성할 수 있게 된다. 둘째, 신경경제학은 행동과 신경생물학(예, 신경영상학) 간의 중재변인과 행위변인을 결합하는 ‘다수준 연구(multi-level research)’를 가능하게 하고, 다수준에 걸쳐서 의사결정을 기술하는 공통적인 메타포를 사용하게 한다. 마지막으로, 신경경제학은 정신질환에서 보상과 관련된 의사결정 연구를 위한 공용언어(common language)를 제시함으로써, 신경과학으로부터 경제학, 정신의학, 임상 및 사회심리학까지 다양한 학문의 연구자에게 동일한 플랫폼을 제공하게 된다.⁵⁾ 본 논문은 경제학의 기본적인 개념과 경제학의 방법론에 기초한 신경경제학의 이론을 살펴보고, 정신의학 영역의 기존 연구결과를 토대로 신경경제학적 방법론의 적용가능성을 고찰하고자 한다.

경제학의 기본적인 개념

신경경제학에서 차용하고 있는 경제학의 기본적인 용어와 개념을 향후 논의의 진행을 위해 간략하게 제시하고자 한다. 특히, 이러한 개념이 수식으로 표현되는 방식을 활용하여 정량적 모형의 개발에 적용 가능함에 주목할 필요가 있다.

선호체계(Preference)

세상에 단 하나뿐인 가게에서 쌀, 물, 사과만을 판매하고 있다고 가정할 때, 소비자(이하 의사결정자)가 쌀 3, 물 2, 사과 3을 소비한다면 이러한 상품묶음은 $x_1=(3, 2, 3)$ 이라는 하나의 벡터로 표현할 수 있다. 쌀 1, 물 3, 사과 2를 소비하는 상품묶음인 $x_2=(1, 3, 2)$ 를 x_1 보다 선호할 경우 $x_2 > x_1$ 로 표시한다. 선호체계는 의사결정자가 다양한 상품묶음 중에 더 선호하는 것과 그렇지 않은 것을 판단하여 구분함을 일컫는다. 이때 상품묶음에 포함되어 의사결정자에게 만족을 주는 상품은 금전(money)일 수도 있으며, 여가 시간 등과 같이 무형적인(intangible) 것일 수도 있다.

효용함수(Utility function)

효용함수는 특정한 상품묶음이 의사결정자에게 주는 만족감의 정도를 하나의 실수(real number)로 표현하는 함수이다. 효용함수는 상품 선택에 관한 의사결정을 분석하기 위해서 선호체계를 구체적이고 체계적으로 표현하기 위한 목적으로 도입되었다. n 개의 상품묶음이 주는 만족감의 정도를 나타내는 효용함수 U 는 아래와 같이 표현된다.

$$U=f(w_1, w_2, \dots, w_n)$$

위 선호체계의 예를 효용함수에 적용하면, 상품묶음 x_1 과 x_2 가 제공하는 만족감은 각각 실수 a, b 로 변환시킬 수 있다 [$U(x_1)=a, U(x_2)=b$].

기대효용(Expected utility)

현실에서의 의사결정은 필연적으로 불확실성을 전제할 수 밖에 없다. 위의 선호체계에서 의사결정자가 상품묶음 x_1 을 소비하기로 선택하는 것이 항상 확실할 수만은 없는 것이다. 이를 테면, 10%의 확률로 내가 주문하지 않은 상품묶음 x_2 가 배송될 수 있는 상황은 이제 확률개념을 적용하여 기대값을 계산하는 것처럼 기대효용으로 표현할 수 있다.

$$E[U(X)] = \sum_{i=1}^n p_i U(x_i)$$

현재가치(Present value)와 할인(discounting)

현재가치는 금전을 소비(선택) 가능한 상품으로 간주하여 논의를 진행할 때 적용하는 개념이다. 현재의 100원이 1년 후의 100원과 같다고 할 수 없는 이유는 현재의 100원을 은행에 맡길 경우 1년 후에는 이자만큼 금전이 증가하기 때문이다. 그래서 1년 후의 100원은 1년 동안의 기회비용을 고려하기 위해 이자율로 할인(discounting)하여 오늘의 현재가치로 환산한다.

$$PV = \frac{FV_n}{(1+r)^n}$$

(PV : present value, FV : n 시점에서의 가치, r : 할인율) 이는 곧 ‘시간’의 개념을 가치로 적용하여 수식으로 표현한 것이다.

최적화(Optimization)

경제학에서 의사결정자는 스스로 기대하는 바를 가능하면 극대화(maximization)하고 기대하지 않는 바를 극소화

(minimization)하는 의사결정을 하려고 한다. 최적화는 이 극대화와 극소화를 통합하여 지시하는 용어이다. 의사결정은 결국 최적화의 결과물이며, 효용함수(혹은 기대효용)의 값이 극대화되는 지점에서 발생하게 된다.

게임(Game)

게임은 둘 이상의 참가자(player)가 각각 자신의 이익을 추구하고 있지만 어느 누구도 그 결과를 마음대로 좌우할 수 없는 경쟁적 상황을 뜻한다. 게임은 참가자, 각각의 참가자가 자신의 이익을 추구하며 취하는 행동인 전략(strategy), 게임의 결과로 참가자가 얻는 이익인 보수(payoff)로 구성된다. n 명의 참가자가 각자의 전략(S_i)을 가지고 게임 결과에 따라 얻는 보수를 효용함수(u_i)로 표현한 기본적인 게임은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$G=\{S_1, \dots, S_n; u_1, \dots, u_n\}$$

전략과 보수의 구조, 게임의 반복횟수 등 그 구조에 따라 죄수의 딜레마, 신뢰 게임, 최후 통첩 게임 등으로 알려진 다양한 게임을 고안할 수 있다.

균형(Equilibrium)

일단 어떤 상태가 달성되면 새로운 교란요인이 없는 한 그대로 유지되려는 경향이 있을 때, 그 상태를 가리켜 균형이라고 부른다. 예를 들어, 어떤 상품의 수요와 공급이 일치되는 지점이 균형이다. 게임에서는 각각의 참가자들이 바뀌지 않고 최종적으로 선택하는 전략에 의해 발생하는 결과가 균형이다. 근본적으로 최적화와 균형의 의미는 유사하게 사용할 수도 있으나, 본 논문에서 최적화는 의사결정자의 의사결정이 자신에게 주어진 자원의 한계와 선호체계에 근거하여 이뤄지는 것에, 균형은 타인(예 : 게임의 다른 참가자)과의 상호작용을 고려한 결과임을 구분하여 설명하는 데 초점을 두었다.

본 론

본 논문은 정신의학 영역에서 신경경제학의 적용가능성을 다음의 견지에서 제시하고자 한다. 첫째, 의사결정의 결과를 실수(real number)로 표현함으로써 정량적 판단의 기준으로 사용할 수 있는 효용함수를 이용하여 의사결정을 최적 선택의 결과로 간주하는 접근방법을 증상에 따른 정신질환의 범주적인 분류에 적용하여 본다. 둘째, 불확실성에 직면한 상황에서 위험(불확실성) 그 자체가 아닌 개인의 위험

에 대한 태도에 따라 의사결정의 결과가 차별화되는 개념을 이용하여, 위험에 대한 반응의 관찰을 통해 정신질환 증상의 정량적 비교와 측정가능성을 논의하도록 한다. 셋째, 시간의 흐름을 가치로 판단하여 정량적으로 분석하는 접근 방법을 정신질환 환자의 의사결정 과정에 적용해 본다. 이를 테면, 미래에 얻게 될 가치를 낮게 여길수록 중독의 위험이 크다고 볼 수 있는데, 이미 일부 연구는 이러한 결과를 보고한 바 있다. 마지막으로, 게임이론을 이용하여 사회적인 의사결정의 구체화 가능성을 고찰한다. 게임이론은 특히 참가자의 상호작용에 기초한 모형이므로, 정신질환이 타인을 비롯한 사회적 요인으로부터 영향 받는 요인을 동적으로 반영할 수 있다.

효용함수와 전반적인 가치판단 체계(Global valuation system)

효용함수의 개념에 따라 의사결정이 이루어지는 과정을 고찰하면, 의사결정자는 다양한 종류의 선택 가능한 상품류에 대한 선호의 정도를 종합적으로 비교·판단함으로써 그 순서를 결정한 다음에 의사결정자인 스스로에게 가장 큰 효용을 주는 선택을 해서 최적화된 결과를 얻는다. 주목할 점은 신경과학적 연구에서 이러한 효용의 개념이 유용하게 적용될 수 있다는 점이다.

효용과 연관된 뇌의 특정영역이 정서적인 조절장애(emotional dysregulation)가 특징적인 다양한 정신질환과 밀접하게 연관되어 있다고 가정하면, 전반적인 가치판단 체계의 기능부전은 정신질환의 주요한 원인으로서 추론될 수 있다.⁶⁻⁸⁾ 단가아민(monoamine)-관련 기능부전이 다양한 정신질환에 기여한다는 점은 전반적인 가치판단 체계의 영역에서는 다음의 근거로 지지된다.^{6,9,10)} 첫째, 세로토닌(serotonin), 노르에피네프린(norepinephrine), 도파민(dopamine) 등 단가아민 신경전달물질이 보상과 처벌(reward and punishment)의 평가에 있어 중추적인 역할을 담당한다. 둘째, 단가아민을 조절하는 정신작용약제는 조현병, 조증, 우울증, 강박장애, 범불안장애 및 공황장애 등 다양한 정신질환에서 치료적인 효과를 나타낸다. 마지막으로, 강박장애 환자의 90% 이상은 우울증에 이환되어 있는 것처럼, 한 개인에서의 다양한 정신질환의 공존이 확률적으로 우연히 발생하는 것보다 빈번하게 이뤄지는 여건은 전반적인 가치판단 체계나 결정 체계의 결손으로 설명될 수 있다. 정신질환에서 전반적인 가치판단 체계가 손상되어 있다는 가정하에, 정신의학적 증상의 정량적인 평가를 위해 금전적 유인(monetary incentives)을 이용한 연구가 실시되었다. Hasler 등¹¹⁾은 17명의 약물처방을 받지 않은 관해 주요우울장애 환자와 13명의 건강한 대조군을 대상으로 α -methyl-para-tyrosine(이하 AMPT)을 경구로 복

용하여 카테콜라민 결핍을 유발하여, 무작위할당, 위약대조, 이중맹검 교체 연구를 실행하였다. 그 결과로, AMPT-유발 우울증상은 금전적인 유인 지연과제(monetary incentive delay task)의 모든 유인 수준에서 반응시간에서 AMPT-유발 변화와 유의하게 관련되었다($r=0.58-0.82$, $p<0.002$). 즉, 실험적인 도파민 결손(experimental dopamine depletion)으로부터 유발된 우울증상과 금전에 대한 관심의 결여 간에 특이적이고 상대적으로 강한 관련성을 시사한다고 볼 수 있다. 이러한 결과는 의사결정에 대한 이론적 접근이 단가야민-결핍과 관련된 우울증의 연구에 적용 가능하다는 것을 반영한다. 또한, Gotlib 등¹²⁾은 13명의 반복성 우울증 어머니의 정신 질환에 이환된 적이 없는 10~14세 딸(고위험군)과 13명의 우울증의 가족력이 없는 정신질환에 이환된 적이 없는 연령대 동한 딸(저위험군)을 보상과 상실을 기대하고 수용하는 동안 fMRI를 적용하여 보상과 주의의 신경회로에 대한 활성도를 평가하였다. 그 결과로 이익이 기대되는 동안에 고위험군은 저위험군에 비해 피각(putamen)과 좌측 내섬엽의 활성도 감소를 나타내었다. 또한 처벌을 받을 때는 고위험군은 저위험군에 비해 등측 전측 대상회(dorsal anterior cingulate gyrus)의 활성도 증가를 나타내었다. 한편, 저위험군은 미상핵(caudate)과 피각의 활성도 증가를 나타내었다. 즉, 금전의 득실(winning and losing money)에 대한 신경반응(neural response)에서의 변화가 우울증의 가족 위험성과 관련될 수 있음이 제안되었다. 이러한 추론은 금전의 득실에 대한 신경반응의 변화가 단지 우울증의 결과에 불과한 것이 아니라 우울증상의 발생 이전에도 발생할 수 있음을 시사하는 것이다. 이와 같은 결과는 효용함수 개념에 근거한 의사결정 체계가 경제적인 의사결정과 관련된 정신 질환의 이해에 적용될 수 있을 뿐만 아니라 보다 심각한 증상의 병인을 설명하는 데 적용될 수 있는 가능성을 지니고 있어, 중개연구적인 개념으로서의 의의가 있다고 할 수 있다. 더불어, 기능적 신경영상학을 방법론적으로 적용하여 향후 구체적으로 식별할 수 있는 증상학적 진단도구로서의 사용 가능성이 제시되었다고 하

겠다.

위험에 대한 태도와 우울증

현실의 의사결정은 항상 불확실성에 직면해 있다. 예를 들면, 미래의 사고 발생 여부를 모르는 상황에서 보험의 가입 여부를 결정해야 할 때, 보험에 가입하지 않은 사람은 사고가 난 경우의 손실이라는 위험을 감수해야 하고 보험에 가입한 사람은 사고가 나지 않을 경우의 손해에 대한 부담이라는 위험을 감수해야 한다. 이렇게 불확실성을 내포하고 있는 상황에서 의사결정은 항상 일정한 수준의 위험을 수반한다. 불확실성으로 인해 발생하는 위험부담에 대한 의사결정자의 태도 차이는 효용함수를 이용해 구별해 볼 수 있다. 예를 들어, 990원을 확실하게 얻을 수 있는 상황(A)과 10%의 확률로 9000원을 90%의 확률로 100원을 얻을 수 있는 상황(B)에 참여하는 것을 효용함수로 표현하면 다음과 같다.

$$A : U(990)$$

$$B : 0.1 U(9000) + 0.9 U(100)$$

흔히 경제학에서 위험에 대한 태도는 크게 세 가지 부류로 나누어 분류한다. A에서 얻는 만족과 B에서 얻는 만족을 동일하게 간주하는 사람은 위험중립적(risk neutral)이라고 볼 수 있다. 이 사람에게 B의 효용은 기대수익($0.1 \times 9000 + 0.9 \times 100$)과 동일하다. 한편, A를 선호하는 사람은 위험회피적(risk averse)이다. 반면, B를 선호하는 사람은 위험선호적(risk loving)이라고 할 수 있다. 이것은 불확실성 아래에서 기대수익이 아니라 기대효용이 선택의 기준이 됨을 제시하며, 의사결정자의 위험에 대한 태도에 따라 선택의 결과가 달라지는 것을 설명해준다. 세 가지 부류의 효용함수는 그림 1과 같이 표현될 수 있으며, 위험회피적인 의사결정자의 효용함수는 위험선호적인 의사결정자에 비해 볼록한 모양을 띠게 되고, 각각은 자신의 효용함수를 최적화하려고 한다.

그러나 실제로는 불확실성이 존재하는 상황에 직면한 의

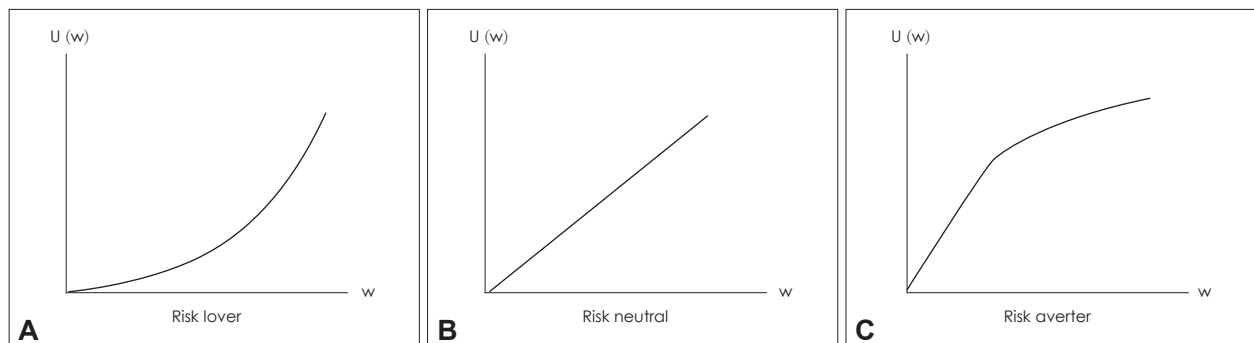


Fig. 1. Utility functions according to risk aversion.

사결정자가 전통적인 경제학의 기대효용의 설명과 달리 최적화된 선택을 하지 않는 경우도 있다. 이에 행동경제학적 관점에서 Kahneman과 Tversky¹³⁾는 의사결정자가 실제 결과가 아니라 자신의 전망에 따라 가치를 판단하고 선택한다는 전망이론(prospect theory)을 제시하였으며, 이는 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$U = \sum_{i=1}^n w(p_i) v(x_i)$$

$$v(x) = \begin{cases} x^\alpha & (x \geq 0) \\ -\lambda(-x)^\beta & (x < 0) \end{cases}$$

전망이론에서 표현된 기대효용 U 는 앞서 제시된 전통적인 기대효용과 다음의 두 가지 면에서 차이점이 있다. 첫째, 각 사건이 발생할 확률 p_i 에 가중 함수 w 가 적용되는데, 이는 의사결정자가 낮은 확률인 경우 과잉반응하고, 높은 확률에는 과소반응하는 경향을 표현한다. 둘째, $v(x)$ 는 의사결정으로 얻게 되는 x 의 판단가치이다. α 와 β 는 각각 가치판단 함수 v 의 모양(볼록한 정도)을, λ 는 손해를 기피하는 정도(loss aversion)를 나타내는 계수이다. Hastie와 Dawes¹⁴⁾에서 λ 의 중간값은 2.25로 나타났는데, 즉 의사결정자가 x 만큼 이익인 것보다는 x 만큼 손해인 경우에 더 민감하게 반응한다는 것이다. 예를 들어 5%의 확률로 100만 원을 벌 수 있다면 사람들은 위험 선호적인 태도를 보이지만, 5%의 확률로 100만 원을 잃게 된다면 위험 회피적인 태도를 보인다. 전망이론은 의사결정자가 주관적인 프레임에 토대로 결과를 판단하는 것이 그들이 예상하는 효용에 영향을 끼치고 결과적으로 의사결정에도 차이가 발생하게 된다는 설명을 제시한 의의가 있다.

위험 기피적인 성향은 스트레스-관련 정신질환에서 가장 강하고 일관적인 위험 요인에 해당하는 신경증적 경향(neuroticism)과 위험 회피(harm avoidance)로서 해석될 수 있다. 실제로, 신경영상학적 연구는 불확실성 아래에서의 의사결정이 뇌 특정 영역의 기능적인 측면에 끼치는 영향을 제시해 왔다.¹⁵⁾ 보상 불확실성과 위험 결정에 직면한 동물에서의 신경생리학적 연구는 이와 같은 뇌 영역에서 뉴런에 의한 계산을 연구하는 것으로부터 시작되었다. 도파민 뉴런은 보상이 예측되는 신호를 제시한 이후뿐만 아니라 기대되지 않은 보상을 전달한 이후에도 활동전위의 위상적인 돌발파(phasic burst)를 접화하게 된다. 이러한 체계는 불확실한 보상에 대한 평가에 기여할 수 있다. 기존의 신경경제학적 연구결과는 불확실성의 처리에서 전측 뇌섬엽(anterior insula)의 개입에 대한 근거를 제시한 바 있다.¹⁶⁾ 전측 뇌섬엽의 증가된 반응

성이 다양한 정신질환의 위험성과 관련되었다고 추론할 때, 불확실성의 비정상적인 처리과정은 스트레스가 유발한 정신 병리에 유의하게 기여할 것으로 가정된다.¹⁷⁾ 이러한 자료는 불안장애 환자가 부정적인 자극을 처리하고 평가하고 예상하는 동안에 발생하는 편도 과반응성(amygdala hyperresponsivity)이 잠재적인 위협에 대한 인지적이고 정동적인 반응을 증진시킬 수 있음을 시사한다. 전전두엽(prefrontal cortex)에 종속적인 인지 및 정동의 조절과정은 불안에서 손상될 수 있어, 이러한 성향을 조절하는 능력이 감소된다.¹⁸⁾

한편, Ernst¹⁹⁾는 청소년기에서 성인으로 이어지는 우울증에 신경경제학적 설명을 적용하였다. 우울증은 청소년기에 발생하는 경우가 빈번하다. 청소년기의 우울증에 대한 취약성은 증가된 정서적 강도나 불안정성 및 위험-추구 행동(risk-seeking behavior) 등 명백한 정서 및 동기 반응성과 연관되었다.²⁰⁾ 보상 처리(reward process)는 청소년기 동안 독특한 특징을 나타내는데, 사회적 자극과 불확정성으로 표현되는 자극은 각성을 증진하고 행동을 동기화하는 상당한 잠재력을 획득하게 한다. 이러한 자극이 청소년기 동안 특이적인 방법의 선택에 대한 기저 신경체계에 개입하는지 여부는 신경경제학적 패러다임을 이용하여 평가될 수 있다. 이러한 발달적인 궤도에서 개별적인 변이성은 막대한 반면에, 우울증은 명백한 궤도와 연관되어 있을 것으로 여겨진다. 또한, 선택 양상에 있어 슬픔을 비롯한 감정이 미치는 영향이 성인에서 평가되었는데, 이를테면, 슬픈 감정 때문에 매입하려는 상품의 가치는 높게 평가하여 비싸게 사고, 팔고자 하는 상품의 가치는 오히려 낮게 평가하여 싸게 판다.²¹⁾ 이러한 가치평가의 양상은 손실에 더 민감하게 반응하는 손실 혐오를 감소시킬 수 있다. 우울증 환자는 부정적인 프레임으로 세계를 이해하는 경향이 있고, 프레임의 조절에 덜 민감할 수 있다. 무의욕증과 무쾌감증은 선택에 대한 불확실성이나 일시적인 할인의 영향을 둔하게 할 것으로 예측된다. 이러한 예측은 기능적인 신경영상학에 앞서 살펴본 전망이론을 적용함으로써 평가될 수 있다. 청소년기에 사회적인 자극과 불확실한 자극의 특이적인 가치는 사회적 교환과 같은 패러다임을 포함함으로써 획득될 수 있으며, 궁극적으로 우울증에 대한 취약성에 관하여 잠재적인 단서를 제공할 것으로 기대된다. 예측 오류(prediction error)는 우울증에서 변화될 수 있는데, 특히 부정적인 자극에 대해 편향성을 나타낸다. 이와 연관되게, Cavanagh 등²²⁾은 스트레스가 인지기능에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 사회적 위협에 대한 처벌 민감성(punishment sensitivity)의 형질 취약성(trait vulnerability)과 부정적인 정동(negative affect)의 상태 반응성(state reactivity)의 개별적인 차이를 재강화 학습 동안에 평가하였다. 낮은 형질-수준

처벌 민감도는 높은 수준의 보상 학습과 불량한 수준의 처벌 학습을 예측하였다. 처벌에 보다 민감한 개인은 상반되는 양상을 나타내었다. 고도로 처벌에 민감한 개인은 증가된 상태-수준 부정적인 정동이 처벌 학습의 정확도와 직접적으로 관련되었다. 더불어, 재강화 학습과 병행한 뇌파 연구에서는 우울증 성인이 건강한 대조군에 비해 혐오적인 선택 맥락에 대하여 더욱 강한 뇌파 반응(larger feedback-related negativity)을 나타내었다. 이러한 결과는 우울증 환자에서 내측 전전두엽(medial prefrontal cortex)과 같이 자기-관찰을 담당하는 신경망의 부정적인 사건에 대해 과반응성을 시사한다.

시간가치의 적용과 중독

앞서 살펴본 현재 가치 개념에서 시간의 흐름에 따른 기회비용을 반영하여 미래 시점의 금전 가치를 이자율로 할인하여 평가했던 것처럼 시간의 흐름에 따라 변하는 가치를 효용함수에 적용해 볼 수 있다. 지연할인(delayed discounting)은 기대하는 사건으로 인한 동기가 그 사건의 지연과 역으로 관련되는 경향을 의미하며, 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$V = \sum_{t=0}^{\infty} \frac{U(w_t)}{kt+1}$$

즉, 시간이 지난 후 미래 시점의 효용 $U(w_t)$ 은 시간이 지난 정도에 비례하여 더 할인되어 낮은 가치로 간주되므로, 현재에 가까운 시점일수록 그 효용이 더 높게 평가된다.

실제로, 보다 빠른 정신작용 효과를 나타낼 수 있는 약물섭취의 경로는 더욱 높은 중독 취약성과 연관될 것으로 여겨진다.²³⁾ 만약 의사결정자가 지연할인 행동에서 차이를 나타낸다면, 미래의 효용을 크게 할인하는 경우 중독에 대한 위험성이 심할 수 있다. 이러한 맥락에서, 물질사용장애(substance use disorders) 환자에서 심한 지연할인이 많이 보고되었다.^{24,25)} 이러한 연관성은 부분적으로 만성적인 약물 사용의 효과에 기초한 것이기는 하나, 종단적인 자료는 사람과 동물을 대상으로 한 모형 모두에서 심한 지연할인이 약물의 부가적인 사용을 예측해줌을 제시하였다.

보상의 시점이 각각 다른 상황에서 선택하는 경우 의사결정자는 그 보상이 지연될수록 그 가치를 평가절하 하게 된다. McClure 등²⁶⁾은 의사결정자가 지연할인이 다양한 금전적인 보상에 있어서의 선택과 상응하는 신경학적 상관자를 fMRI를 이용하여 처음으로 연구하였다. 그 결과 의사결정자는 규모는 다양하지만 비교적 즉각적인 보상을 선택하는 양상을 나타내었다. 이러한 결과는 즉각적인 보상이 주어질 때 변연계나 변연계 주위 영역의 신경망과 같은 뇌의 특정한 영역

에서 활성도가 증가하는 것과 즉각적인 보상이 선택될 때 활성도가 증가함을 제시함으로써, 지연할인을 이용한 예측이 적절함을 나타내었다. 또한, 신경경제학은 일시적인 할인에 대한 뇌의 다양한 영역의 상대적인 활성화를 평가하는 신경영상학적 기술을 이용하여, 일시적인 할인과 관련된 2개의 경쟁적인 신경계를 제안하였다.²⁷⁾ 지연된 결과에 대한 선택은 집행체계(executive system)인 외측 전전두엽, 후측 두정엽(posterior parietal cortex)과 관련되고, 즉각적인 결과에 대한 선택은 충동체계(impulsive system)인 중뇌 도파민 체계(midbrain dopamine system)와 연관된 변연계와 관련된다.

상호작용을 고려한 의사결정과 정신질환의 대인관계 요인

게임이론의 가장 큰 특징은 상호작용을 고려한 의사결정을 표현한다는 점이다. 예를 들어, 다음과 같이 내쉬 균형(nash equilibrium)²⁸⁾을 살펴보면,

$$u_i(s_i^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i^*, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*) \geq u_i(s_i^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*)$$

(nash equilibrium)

$$s_i^* \text{ solves } \max_{s_i \in S_i} u_i(s_i^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*)$$

n명의 참가자가 참여하는 게임에서 균형은 다른 참가자 모두가 스스로에게 최선인 전략 s^* 을 취한다는 가정하에 자신에게 가장 높은 보수를 얻을 수 있는 전략을 선택하게 된다. 이처럼 게임이론에서 균형은 참가자가 자신의 전략을 선택하기 위해서 다른 참가자들이 어떤 전략을 선택할 것인지가 함께 고려되어 결정된다.

한편 게임에 시간의 간격을 적용하여 동적인 모형으로의 표현이 가능하다. 예를 들어 그림 2와 같이 두 명의 참가자가 각기 두 개의 전략을 가지고 순서대로 참여하는 게임에서는 선참가자(player 1)의 전략 선택에 따라 후참가자(player 2)의 보수도 달라진다. 이 게임에서 후참가자가 R을 선택했을 때의 보수는 선참가자가 L을 선택했느냐 R을 선택했느냐에

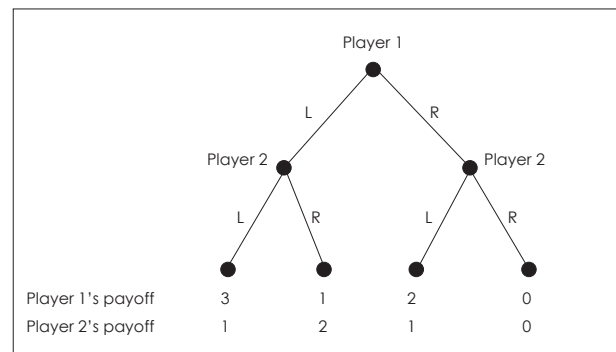


Fig. 2. An example of dynamic game.

Table 1. An example of prisoners's dilemma game

	Prisoner B : cooperates	Prisoner B : betrays
Prisoner A : cooperates	Each serves 1 year	Prisoner A : 3 years Prisoner B : goes free
Prisoner A : betrays	Prisoner A : goes free Prisoner B : 3 years	Each serves 2 years

따라 달라지므로 후참가자는 선참가자의 선택에 따라 다른 전략을 취한다. 이제 게임이 의사결정자의 상호관계를 모형화한다는 특징에 초점을 두고 신경경제학에서 자주 이용되는 협동 게임들을 예시로 살펴보면 다음과 같다.

죄수의 딜레마에는 2명의 죄수(player)가 각자 협력을 위해 침묵하거나 배신하고 자백할 수 있는 2개의 전략이 있으며, 각각 분리된 방에서 상대방의 선택을 알 수 없는 상태에서 의사결정을 하게 된다. 이 때, 협력 혹은 배신의 결과로 받는 죄수가 받는 보수로서의 형량은 표 1과 같다. 두 죄수 모두에게 가장 좋은 결과는 함께 협력하여 침묵하는 것처럼 보이지만, 상대방이 그 자신에게 가장 유리한 전략을 취한다는 가정하에 나의 전략을 선택한다는 내쉬 균형은 둘 다 배신하여 무거운 형량을 받게 되는 결과를 제시한다. 죄수 A의 입장에서 자신이 받게 될 형량은 협력할 경우에는 1년 혹은 3년이지만 배신할 경우에는 풀려나거나 2년이므로, 죄수 B가 어떤 선택을 하든지 배신할 때가 더 유리해진다. 죄수 B의 입장에서든 마찬가지이므로 결국 함께 배신하여 무거운 형량을 받는 것이 균형이 된다는 것이다.

하지만, 행동경제학과 신경경제학에서는 사람들이 실제로 앞의 균형에서처럼 자신의 이익을 극대화하는 선택만을 하지는 않음을 주장한다. 간단한 예로 독재자 게임(dictator game)과 신뢰 게임(trust game)을 들 수 있다. 독재자 게임에서 독재자는 게임시작과 함께 자신에게 주어진 금전을 파트너와 어떻게 나누어 가질지에 대한 모든 결정권을 가지게 된다. 가장 효용이 높은 선택은 혼자 모든 금전을 차지하는 것이지만, 대부분의 사람들은 그렇게 하지 않는다. 신뢰 게임은 이러한 독재자 게임을 확장한 것으로 투자자는 자신이 가진 금전 중에서 얼마만큼을 파트너에게 투자할 것인지를 결정하고, 투자금은 게임의 규칙으로 정해진 수익만큼 증가하게 되며, 투자를 받았던 파트너는 다시 증가한 금액을 투자자와 어떻게 나눠가질 것인지를 결정한다. 신뢰 게임에서도 투자자와 파트너 사이의 협력이 각자가 얻을 수 있는 효용 가치를 높이는 데 영향을 끼친다. 전통적인 경제학에서 주장하는 대로 스스로의 효용을 최적화하는 선택만을 추구하는 것이 아니라 독재자 게임에서와 마찬가지로 타인이 자신을 바라보는 시선, 타인으로부터 얻는 이익에 대한 기대도 의사결정에 영향을 미친다는 주장을 뒷받침하고 있다.

이처럼 의사결정과정을 타인과의 상호작용을 토대로 모형화하는 것은 정신의학에서도 유용하게 적용될 수 있다. 정신의학에서 현재의 진단적인 방법론은 사회적 규범이 아닌 증상에 기초하고 있음에도 불구하고, 증상을 병적인 것으로 분류함에 있어 사회적 기능은 지속적으로 중요한 기준으로 간주되어 왔다. 정신의학적 문제에 대한 모든 종류의 정신치료는 직간접적으로 사회적 적응을 다루고 있다. 그리고 대인관계치료는, 심지어, 본질적으로 사회적이지 않은 정신의학 증상을 감소시키기에 있어서도 효과적이다.²⁹⁾ 앞서 살펴본 독재자 게임과 신뢰 게임에서 확인할 수 있듯이, 사회적 선호(social preference)는 효용의 개념을 다른 사람의 안녕에 가치를 둔다는 사실을 반영하는 개념으로 확장되었다.³⁰⁾ 사회적 선호는 자기에, 이타주의, 불평등 혐오, 배신 혐오 등으로 구성되며, 이러한 요소들은 사회적 협동에 중요한 영향을 끼치게 된다.³¹⁾ 예를 들어, 사회적 불평등에 대한 인간의 반응이 강한 정서를 초래할 수 있는데, 불평등에 대한 역기능적인 정서적 반응은 공식적인 정신의학적 분류체계에서 진단기준으로서 이용된다. 이를테면, 유리한 불공평에 대한 혐오를 반영한 과도한 죄책감은 주요우울장애의 진단기준 가운데 일부이고, 불리한 불공평에 대한 혐오를 반영한 과도한 시기는 자기에 성 인격장애의 진단기준을 구성한다. 한편, 신경경제학 연구는 사회적 공평성에 대한 고려에 있어 뇌가 강한 민감성을 지니고 있음을 입증하기도 하였다. 특히, 이러한 민감성은, 정동 및 인격장애의 병태생리에서 중요한 뇌 영역인 것으로 여겨지는, 선조체(striatum)와 복내측 전전두엽(ventromedial prefrontal cortex)에서 명백하다.³²⁾ 이러한 관찰은 타인과의 상호작용을 통한 사회적 감정이 정신질환의 핵심에 있음을 시사하며, 신경경제학적 도구를 이용한 이러한 기능부전의 양적인 평가가 진단적인 정확성을 향상시킴에 기여할 것으로 여겨진다.

정신질환에서 대인관계가 차지하는 중요성에도 불구하고, 사회적인 장애의 신경생물학에 대해 많이 밝혀지지 않은 것은, 부분적으로, 대인관계 과정을 매개변수를 통해 정립하고 정량화하는 것이 쉽지 않기 때문이다. 하지만, 최근의 기능적 신경영상학의 발전, 행동경제학으로부터 유래된 참가자가 다수인 게임 및 정량적인 접근의 결합은 정신질환에서 대인관계 기능과 역기능을 연구할 수 있는 패러다임을 설정

하도록 노력하였다. 특히 참가자가 다수인 구조의 게임은 정신질환에서 사회적인 장애의 정도와 유형을 촉발하고, 관찰하고, 측정할 수 있는 도구를 제공해준다. 이를 통해 사회적 행동에 대한 정량적인 행동 기준을 설정할 수 있는데, 이러한 기준은 실제적인 사회적 파트너를 설계하는 것에 이용될 수 있다. 기본적인 행동경제학 패러다임의 적용을 위해 선호되는 참가자는 서로 교류하고 있는 실제 사람인 참가자이지만, 사람처럼 행동하도록 설계된 컴퓨터 에이전트도 사람 사이의 상호작용의 규범적인 자료를 표면화하거나 사전에 결정된 전략을 실행하도록 알고리즘을 구현함으로써 생성될 수 있다.³³⁾ 이러한 컴퓨터 “참가자”가 특히 유용할 때는 자유도가 한 쌍이나 집단보다는 오히려 정신질환 환자에 해당되고 파트너 행동의 표준화가 요구되는 경우이다.

다음으로 다양한 정신질환에 동반되는 일탈적인 사회적 동력학(aberrant social dynamics)과 수반되는 신경생물학의 이해를 위해 게임이론을 이용한 신경경제학적 접근의 유용성을 제시하고자 한다. King-Casas 등³⁴⁾은 손상된 사회적인 동력학에 상응하는 기저 신경행동학적 기전을 평가하기 위해, 55명의 경계성 인격장애 환자가 건강한 파트너와 함께 반복된 형태의 신뢰 게임을 실시하도록 하였다. 그 결과, 행동학적으로 경계성 인격장애 환자는 협력을 유지하기 위한 능력이 현저하게 제한되고 파괴된 협력을 회복하는 능력이 유의하게 손상되었다. 신경과학적으로는 정동, 경제, 사회적 차원에서 위반 규준에 상응하는 영역으로 알려진 전측 뇌섬엽의 활성도가 경계성 인격장애에서 건강한 대조군에 비해 현저하게 구별되는 양상을 나타내었다. 즉, 경계성 인격장애 환자는 건강한 참가자에 비해 비협력적인 몸짓에 대하여 상대적으로 비정상적인 신경반응을 나타내었다. 협력이 불안정해지기 시작할 때, 건강한 참가자는 전측 뇌섬엽에서 증가된 혈류역학적 활성도를 나타내었고 이러한 신경반응은 자신의 파트너로부터 협력을 끌어내려는 시도를 선행하였다. 반면에, 경계성 인격장애 환자는 협력의 수준에 대한 뇌섬엽의 상대적인 둔감성을 나타내었고 파트너로부터 협력을 이끌어내려는 시도가 덜 하였다. Rilling 등³⁵⁾은 죄수의 딜레마로 알려진 협력게임을 이용하여, 고도의 정신병질(high-psychopathy) 환자를 포함한 한 쌍은, 심지어 성공적으로 협력한 이후에도, 경도의 정신병질(low-psychopathy) 환자를 포함한 한 쌍에 비해 상대적으로 더욱 상호적인 변질(mutual defections)을 초래한다고 보고하였다. 더군다나, 고도의 정신병질 환자는 변절에 뒤따르는 낮은 편도 활성도를 나타내었는데, 이것은 변절이 부정적으로 재강화되지 않는 사회적 학습 과정의 손상을 시사한다. 이처럼 신경경제학적 게임은 정신질환의 유형을 구별함에 있어 유용할 것이다.

Sripada 등³⁶⁾은 의사결정자가 실제적인 사회적 파트너의 활동이나 컴퓨터 파트너의 활동을 고려하고 있을 때 신경반응을 비교하는 신뢰게임을 적용하여, 범불안장애 환자가 타인에 대한 정신상태를 귀속하는 정신화 및 사회인지 능력을 평가하였다. 그 결과, 범불안장애 환자는 비사회적 파트너에 비해 사회적 관련자에 있어 마음이론(theory-of-mind)³⁷⁾이 관련된 내측 전전두엽의 감소된 활성도를 나타내었다. 이러한 결과는 내측 전전두엽 기능의 감소가 사회적인 불안의 사회인지 병태생리에서 중요한 역할을 함을 시사한다. 그리고 사회적인 불안의 추론적인 장애는 인격장애 환자에서 관찰되는 결과와 구별된다. 그리고 이러한 자료는 다시 한번 구체적인 상호관계에서의 이상이 신경경제학적 접근방법을 통해 테스트될 수 있음을 예시한다. 한편, 자폐증 스펙트럼 장애(autism spectrum disorder, 이하 ASD)에서 상호적인 반응성의 감소는 주요한 특징이고 다른 사람의 생각을 잘 추론하지 못하는 것이 이러한 장애에 기여하는 것으로 간주된다.³⁸⁾ Yoshida 등^{39,40)}은 ASD 환자의 이질성을 탐색하기 위하여 사회적인 상호관계에서 계산적인 과정을 특징화하는 게임이론을 활용하여 추론과정을 모형화하였다. 그 결과로 ASD 환자는 타인의 마음을 추론하는 전략에 해당하는 타인의 전략적인 복잡성의 수준을 추론하는 능력이 선택적으로 제한됨을 나타내었다. 즉, 이러한 결과는 컴퓨터 파트너를 이용한 연구를 통해 사회인지의 컴퓨터 모형으로 ASD를 비롯한 정신질환에서 손상된 사회적인 동력학의 기전을 설명할 수 있는 가능성을 시사한다고 하겠다.

더불어, 선조체로부터 복내측 전전두엽에 이르는 뇌의 보상체계에 의해 발생하는 협력하기 위한 동기는 2개의 신경망으로 조절된다.⁴¹⁾ 인지적인 조절 체계는 외부적인 협력의 장려를 처리하며 외측 전전두엽에 위치하는 반면에, 사회적 인지 체계는 신뢰 및 위협 신호를 처리하고 측두-두정 접합(temporo-parietal junction), 내측 전전두엽, 편도체를 포함한다. 협력하기 위한 결정에 대해 장려와 신뢰의 독립적인 조절적인 영향은 신경영상학적 자료를 통해 입증되며, 경제적 대 사회적 합리성 사이의 명백한 역설을 조화시켜준다. 더군다나, 게임이론을 활용한 접근은 친사회적 행동에서 존재하는 행동의 이질성을 상당부분 설명할 수 있다.

결론 및 요약

본 논문에서 정신의학에 신경경제학적 개념을 적용한 내용을 간략하게 요약하면 다음과 같다. 첫째, 전반적인 가치 판단 체계에 상응하는 신경계 상관계에 대해 효용함수를 적용함으로써, 경제적(금전적)인 의사결정이 지니는 우울증상

의 형질 표지자(trait marker)로서의 가능성이 제시되었다. 둘째, 위험에 대한 태도를 우울증에 적용함으로써, 무의욕증과 무쾌감증이 선택의 불확실성에 미칠 수 있는 영향을 감소시킬 수 있음이 예측되었다. 셋째, 의사결정자의 가치 판단에 시간적인 차이가 반영됨을 통해 물질관련장애 등 중독질환의 모형화가 시도되었다. 마지막으로, 게임이론을 통해 상호작용을 고려한 의사결정 과정을 정신질환의 사회적인 요인에 적용함으로써, 기존의 질병기술학이 경제성 인격장애, 반사회성 인격장애, 범불안장애 및 자폐성 스펙트럼 장애 등 정신질환의 기술에 있어 증상에 국한되었던 제한점에 대해 대안적인 이론적인 준거로서의 가능성이 제시되었다. 정신의학의 발전은 다양한 환원주의적 접근을 거쳐 '통합적인 접근'으로 회귀하는 과정을 거쳐 왔다.⁴²⁾ 궁극적으로, 신경경제학이 정신의학의 이론적 준거로서 지니는 가능성도 역시 통섭의 영역에서 고찰할 수 있다. 향후 신경경제학과 정신의학의 간학제적 연구가 추가적으로 이루어져서, 정신의학의 진단기술학에 있어 새로운 범주적 접근의 가능성과 정신질환의 이론적 준거로서의 가능성이 더욱 구체화되기를 기대한다.

중심 단어 : 신경경제학 · 정신질환 · 효용함수 · 위험회피 · 게임이론.

Acknowledgments

This research was supported by a grant from the Korea Health 21 R&D, Ministry of Health and Welfare, Republic of Korea (A102065).

Conflicts of Interest

The authors have no financial conflicts of interest.

REFERENCES

- 1) Camerer C, Loewenstein G, Prelec D. Neuroeconomics: how neuroscience can inform economics. *Journal of Economic Literature* 2005;43:9-64.
- 2) Center for Neuroeconomics Study at Duke University. Available from <http://neuroeconomics.duke.edu/research/research2.html>.
- 3) Glimcher PW, Rustichini A. Neuroeconomics: the consilience of brain and decision. *Science* 2004;306:447-452.
- 4) Hasler G. Can the neuroeconomics revolution revolutionize psychiatry? *Neurosci Biobehav Rev* 2012;36:64-78.
- 5) Sharp C, Monterosso J, Montague PR. Neuroeconomics: a bridge for translational research. *Biol Psychiatry* 2012;72:87-92.
- 6) Hasler G. Can the neuroeconomics revolution revolutionize psychiatry? *Neurosci Biobehav Rev* 2012;36:64-78.
- 7) Hasler G, Drevets WC, Gould TD, Gottesman II, Manji HK. Toward constructing and endophenotype strategy for bipolar disorders. *Biol Psychiatry* 2006;60:93-105.
- 8) Hasler G, Drevets WC, Manji HK, Charney DS. Discovering endophenotypes for major depression. *Neuropsychopharmacology* 2004; 29:1765-1781.
- 9) Dayan P, Huys QJ. Serotonin in affective control. *Annu Rev Neurosci* 2009;32:95-126.
- 10) Hasler G, LaSalle VH, Ronquillo J, Tunison S, Cochran LW, Greenberg BD, et al. Obsessive-compulsive disorder symptom dimensions show specific relationships to psychiatric comorbidity. *Psychiatry Res* 2005;135:121-132.
- 11) Hasler G, Luckenbaugh DA, Snow J, Meyers N, Waldeck T, Geraci M, et al. Reward processing after catecholamine depletion in unmedicated remitted subjects with major depressive disorder. *Biol Psychiatry* 2009;66:201-205.
- 12) Gotlib IH, Hamilton JP, Cooney RE, Singh MK, Henry ML, Joormann J. Neural processing of reward and loss in girls at risk for major depression. *Arch Gen Psychiatry* 2010;67:380-387.
- 13) Kahneman D, Tversky A. Prospect theory-analysis of decision under risk. *Econometrica* 1979;47:263-291.
- 14) Hastie R, Dawes RM. *Rational Choice in an uncertain world: The psychology of judgment and decision making*. 2nd ed. Thousand Oaks, California: Sage Publications;2001.
- 15) Platt ML, Huettel SA. Risky business: the neuroeconomics of decision making under uncertainty. *Nat Neurosci* 2008;11:398-403.
- 16) Mohr PN, Biele G, Heekeren HR. Neural processing of risk. *Neurosci* 2010;30:6613-6619.
- 17) Paulus MP, Rogalsky C, Simmons A, Feinstein JS, Stein MB. Increased activation in the right insula during risk-taking decision making is related to harm avoidance and neuroticism. *Neuroimage* 2003; 19:1439-1448.
- 18) Hartley CA, Phelps EA. Anxiety and decision-making. *Biol Psychiatry* 2012;72:113-118.
- 19) Ernst M. The usefulness of neuroeconomics for the study of depression across adolescence into adulthood. *Biol Psychiatry* 2012;72:84-86.
- 20) Ernst M, Pine DS, Hardin M. Triadic model of the neurobiology of motivated behavior in adolescence. *Psychol Med* 2006;36:299-312.
- 21) Lerner JS, Small DA, Loewenstein G. Heart strings and purse strings: carryover effects of emotions on economic decisions. *Psychol Sci* 2004;15:337-341.
- 22) Cavanagh JF, Frank MJ, Allen JJB. Social stress reactivity alters reward and punishment learning. *Soc Cogn Affect Neurosci* 2011;6: 311-320.
- 23) Arrow KJ. Rationality of self and others in an economic system. *J Business* 1986;59:S385-S399.
- 24) Gottdiener WH, Murawski P, Kucharski LT. Using the delay discounting task to test for failures in ego control in substance abusers: a meta-analysis. *Psychoanal Psychol* 2008;25:533-549.
- 25) Reynolds B. A review of delay-discounting research with humans: relations to drug use and gambling. *Behav Pharmacol* 2006;17:651-667.
- 26) McClure SM, Laibson DI, Loewenstein G, Cohen JD. Separate neural systems value immediate and delayed monetary rewards. *Science* 2004;306:503-507.
- 27) Bickel WK, Miller ML, Yi R, Kowal BP, Lindquist DM, Pitcock JA. Behavioral and neuroeconomics of drug addiction: competing neural systems and temporal discounting processes. *Drug Alcohol Depend* 2007;90:S85-S91.
- 28) Nash J. Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 1950;36:48-49.
- 29) Fairburn CG, Norman PA, Welch SL, O'Connor ME, Doll HA, Povelner RC. A prospective study of outcome in bulimia nervosa and the long-term effects of three psychological treatments. *Arch Gen Psychiatry* 1995;52:304-312.
- 30) Fehr E, Schmidt K. A theory of fairness, competition and cooperations. *Quart J Econ* 1999;114:817-868.
- 31) Camerer CF, Fehr E. Measuring social norms and preferences using experimental games: a guide for social scientists. In: Henrich J, Boyd R, Bowles S, Camerer C, Fehr E, Gintis H, editors. *Foundations of human sociality*. New York: Oxford University Press;2004.
- 32) Tricomi E, Rangel A, Camerer CF, O'Doherty JP. Neural evidence for inequality-averse social preferences. *Nature* 2010;463:1089-1091.
- 33) King-Casas B, Chiu PH. Understanding interpersonal function in psychiatric illness through multiplayer economic games. *Biol Psychiatry*

- 2012;72:119-125.
- 34) King-Casas B, Sharp C, Lomax-Bream L, Lohrenz T, Fonagy P, Montague PR. The rupture and repair of cooperation in borderline personality disorder. *Science* 2008;321:806-810.
- 35) Rilling JK, Glenn AL, Jairam MR, Pagnoni G, Goldsmith DR, Elfenbein HA, et al. Neural correlates of social cooperation and non-cooperation as a function of psychopathy. *Biol Psychiatry* 2007;61:1260-1271.
- 36) Sripada CS, Angstadt M, Banks S, Nathan PJ, Liberzon I, Phan KL. Functional neuroimaging of mentalizing during the trust game in social anxiety disorder. *Neuroreport* 2009;20:984-989.
- 37) Amodio DM, Frith CD. Meeting of minds: the medial frontal cortex and social cognition. *Nat Rev Neurosci* 2006;7:268-277.
- 38) American Psychiatric Association. *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders*, 4th ed. Washington DC: American Psychiatric Association;2000.
- 39) Yoshida W, Dziobek I, Kliemann D, Heekeren HR, Friston KJ, Dolan RJ. Cooperation and heterogeneity of the autistic mind. *J Neurosci* 2010;30:8815-8818.
- 40) Yoshida W, Dolan RJ, Friston KJ. Game theory of mind. *PLoS Comput Biol* 4:31000254:2008.
- 41) Declerck CH, Boone C, Emonds G. When do people cooperate? The neuroeconomics of prosocial decision making. *Brain and Cognition* 2013;81:95-117.
- 42) Cho SC. The Concept of Consilience in the Field of Psychiatry. *J Korean Neuropsychiatr Assoc* 2012;51:349-358.