

미러뉴런시스템과 뇌졸중 재활

김 식 현

선린대학 물리치료과

Mirror Neuron System and Stroke Rehabilitation

Sik-Hyun Kim, PT.,MS.

Department of physical therapy, Sunlin College

<Abstract>

Purpose : The purpose of this article was to review the literature on mirror neuron system with reference to its functional diversity in stroke rehabilitation..

Method : This review outlines scientific findings regarding different neurophysiological properties in mirror neurons, and discusses their involvement in process of stroke rehabilitation.

Result & Conclusions : Mirror neurons were first discovered in macaque monkey. These neurons, like most neurons in F5 areas in premotor cortex, fired when an individual performs an action, as well as when he/she observes a similar action done by another individual, although originally fired only during action execution. Mirror neurons form a network for motor planning and initiating of motor action. Thus, in stroke rehabilitation based on the mirror neuron-action observation, motor imagery, observation with intent to imitate and imitation-may help activate mirror neuron system for improved outcome of physical therapy. These studies provide a scientific theoretical basis and discuss for the use of mirror neuron system as a complement to clinical physical therapy in stroke rehabilitation.

Key Words : Mirror neuron, Motor imagery, Stroke rehabilitation.

I. 서론

원숭이 등의 유인원의 뇌영역 PMv(ventral Pre-motor)과 IPr(rostral inferior parietal)신경의 경우 손 또는 입의 실제적 활동시 발화하는 신경이지만, 동물들이 직접 손이나 입 등의 활동이 없이 다른 상대의 같은 활동을 지켜보는 것만으로도 신경이 발화되는데 이러한 신경을 거울신경(mirror neurons)이라 한다(Rizzolatti 등, 1987). 이러한 거울신경은 인간의 경우에도 존재하며, 원숭이의 거울신경과 해부학적으로 유사한 기능적 특성이 있는 것으로 확인되었다(Rizzolatti 등, 1998). 따라서 본 연구는 거울신경의 최근까지의 연구결과를 토대로 물리치료 임상에서의 그 치료적 접근을 위한 과학적 근거를 고찰하고자 한다.

II. 거울신경의 신경해부학

거울신경은 처음 짧은 꼬리 원숭이의 vPM의 F5 영역에서 처음 존재하는 것으로 확인되었고, F5의 대다수 신경들은 “어떤 특이적 목적”의 운동시 반응하는 신경들이다. 여러 연구결과들이 혼재되어 다양한 이견이 존재하지만 이들 신경들은 어떠한 목적없이 단순한 운동을 실시할 때 신경이 흥분하지 않으며, 이들 F5영역의 뇌신경세포와 유사한 특성을 지닌 세포가 원숭이 IPL(inferior parietal lobule) 영역에도 존재한다(Rizzolatti 등, 1998). 이들 두 영역의 신경세포들은 행동발생을 구성하는 두정-전두엽 신경회로 시스템 회로의 신경회로를 형성한다. 행동과 관련된 시각정보는 STS와 연결되어 F5 영역에 도달되고, 운동행위 등의 신경활동에 대해서는 신경발화가 발생하지 않는다. 특히 두정-전두엽 영역의 거울신경은 “상대방의 운동을 보고 운동 활동을 이해하는 것”이라는 기능적 역할을 담당하며, 이러한 기능을 담당하는 인간의 거울신경은 두정-전두엽 영역과 전운동피질 및 변연계에서 존재하는 것으로 확인되었다(Rizzolatti와 Craighero, 2004; Filimon 등, 2007). 이러한 연구결과를 토대로 생각해 볼 때 두정-전두엽의 거울신경은 “수의적 운동의 인지”에 핵심적 역할을 담당하고, 변연계에 존재하는 거울신경은 “감정적 행동의 인지”에 기능한다는 것을 유추할 수 있다. 따라서 치료적 운동과

감정 또는 정서 등의 정신심리적인 인자는 매우 깊은 치료적 관련성을 내포하는 것으로써 매우 주의 깊게 치료적으로 접근하여야 한다.

건강한 성인을 대상으로 한 연구에서 상대방의 운동행동을 관찰할 때 일차운동 영역에서 “역치하” 범위이지만 신경반응이 나타나는 것을 확인하였다(Fadiga 등, 2005). 이러한 현상은 운동관찰과 운동신경 발화에 어떠한 신경학적 기전이 있는 것을 생각할 수 있는 사실로써, 흥미롭게도 실험군의 뇌에서 확인된 뇌활성 신경반응은 같은 근육에서도 신경반응이 나타난다. 특히 거울신경계의 활성화는 운동학습과도 밀접한 관련 있으며(Calvo-Merino 등, 2005), 실험에 참여하는 행동 관찰자의 운동경험이 거울신경의 지대한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 임상환경에서의 치료적 접근시 환자들의 다양한 예전 경험과 직업, 행동양식 등을 잘 파악하여 치료하는 것이 매우 중요한 것이라는 것을 알 수 있는 매우 유익한 결과이다. 더욱 흥미로운 결과 중 Stefan 등(2008)의 연구에 의하면 정교한 운동기술의 습득은 운동관찰과 운동실행을 함께 적용한 군에서 운동기억의 형성이 더욱 촉진되며 운동피질의 신경가소성이 더욱 증가되는 것으로 보고하였다. 이러한 결과는 단순한 하나의 치료적 접근보다는 보다 다양한 환경에서의 환자에게 꼭 필요한 치료적 중재의 적절한 결합이 환자 기능의 개선에 더 중요하다는 것을 알 수 있는 결정적 근거가 된다.

III. 거울신경 생리

거울신경의 신경발화는 손의 기능인 쥐기, 잡기, 찢기, 만들기 등의 손의 기능과 밀접한 관련이 있다(Gallese 등, 1996). 또한 입의 기능인 음식섭취와 대화 등의 입술의 반응시 신경이 반응한다(Ferrari 등, 2003). 거울신경은 위에 기술한 특징적 활동을 할 때 신경발화가 되는 특성을 지니고 있지만, 운동실행시 다소 약한 반응을 나타내나 단순히 상대의 활동을 관찰하는 것만으로도 신경발화가 되는 특성을 지닌다.

거울신경은 기능적 특성을 고려하여 두 가지 종류로 구분한다. i) 명확히 일치하는 신경, ii) 광범위하게 일치하는 신경. 명확히 일치하는 거울신

경은 모든 거울신경의 약 1/3정도를 차지하며, 정확하게 같은 행동을 할 때 신경이 반응한다. 광범위하게 일치하는 거울신경은 전체 거울신경의 2/3정도를 차지하며 유사한 행동 또는 같은 목적으로 행해지는 행동시 발화한다(di Pellegrino 등, 1992; Rizzolatti와 Craighero, 2004). 광범위하게 일치하는 거울신경의 수가 많다는 것은 거울신경이 단순히 하나의 기능에만 관여한다는 것이 아니라 광범위한 신경연결을 통해 보다 다양한 기능을 한다는 것을 유추할 수 있다. 거울신경의 다른 특성으로 종이 찢어지는 소리, 호두 등의 견과류 껍질 깨지는 소리 등의 소리 활동과 관련된 소리반응에도 신경반응이 발생한다(Kohler 등, 2002). 환자치료와 관련하여 중요하게 접근할 수 있는 새로운 연구결과로써 vPM-F5(ventral premotor cortex)의 F5c(convexity behind arcuate sulcus)의 거울신경은 도구를 사용하는 활동을 관찰할 때 더욱 활성화되는 특성이 있는 것으로 확인되었다(Ferrari 등, 2005). 도구를 사용할 때 기능하는 거울신경은 시각경험과 밀접한 관련이 있는 것으로써 임상환경에서 반복적인 시지각 자극 중재를 통한 기능적 회복을 유도하는 물리치료의 치료적 근거를 제공하는 매우 중요한 연구결과이다. 행동 관찰(observation)이라는 활동을 환자의 기능회복을 위해 적용함으로써 환자의 기능적 회복을 촉진할 수 있다는 것은 매우 흥미로운 사실이다(Ertelt 등, 2007).

거울신경은 특수한 형태의 신경으로써 실질적인 행동을 할 때에 흥분되지만 다른 사람의 유사한 행동을 보는 경우에도 신경이 흥분하는 특성을 지니고 있다. 이러한 거울신경은 원래 원숭이의 전운동피질에 존재하는 것으로 확인되었지만, 아래두정엽 영역에도 이들 신경이 존재한다(Rizzolatti 등, 2001). 인간의 경우, 원숭이 뇌 영역 F5영역과 유사한 영역인 브로드만 44번과 6번 영역에서 확인되었고 이들 신경은 행동관찰시 명확하게 반응하며(Rizzolatti와 Craighero, 2004), 특히 손가락 운동 등의 보다 기능적인 손 운동을 관찰할 때 더욱 활성화되는 것으로 확인되었다(Cochin 등, 1999). 거울신경계(mirror neuron system)는 “관찰한 행동의 운동학적 묘사”를 담당한다. 따라서 이러한 거울신경계는 이상적인 “운동모방”의 기전을 제시하며, 최근의 fMRI를 사용한 연구에서 전전두엽이 모방행동의 학습에 결

정적인 역할을 담당하고, 특히 브로드만 영역 46번에서 기본적인 운동활성을 보다 복잡한 운동패턴으로 결합하여 기능한다(Buccino 등, 2004).

IV. 뇌졸중 재활과 거울신경

신경회로의 재구성은 감각운동신경에 제공되는 다양한 정보에 의존적으로 변화된다. 그렇지만 운동신경계는 상상하는 것(motor imagery) 또는 운동을 관찰하는 곳 등의 “Offline”방식에 의해서도 신경이 활성화 되고 재구성 될 수 있다.

운동결손은 뇌졸중 후 가장 중대한 신체장애로 급성 뇌졸중 환자의 약 80%는 운동결손을 경험하게 되고, 만성 뇌졸중 환자의 50~60%는 만성 운동장애를 지니게 된다(Hendricks 등, 2002). 이러한 운동결손은 환자의 삶의 질을 떨어뜨리고 심각한 후유장애를 동반한다. 따라서 보다 효과적인 치료적 접근은 환자재활의 촉진과 환자 삶을 질 향상을 위해 필수적이다. 운동기능 회복 과정의 효과성은 운동 활동에 의해 제공되어지는 감각정보의 유용성에 절대적으로 지배되며, 고유수용성 정보, 촉각 정보, 전정기관 정보, 시지각 정보, 청각 정보 등이 운동학습에 절대적 영향을 미치게 된다. 이러한 다양한 신경정보의 체계적 입력은 물리치료 임상에서 가장 중요한 이슈이며, 적절한 신경정보의 입력은 치료적 결과를 절대적으로 보장한다. 운동심상(motor imagery)과 운동관찰 등의 간접적인 경험이 뇌졸중 후 환자 재활에 긍정적인 영향을 미칠 수 있는 것으로 확인되고 있다(Jackson 등, 2001; Page, 2001).

운동심상 과정은 실질적인 운동을 실행하지 않지만 운동을 상상하고 재구성하는 것만으로, 수의적인 운동수행시 신경 동원에 의해 발화하는 것 과 유사한 신경회로의 재구성에 영향을 미친다. 실질적인 운동 수행시 반응하는 뇌활성 영역은 전전두엽, 전운동피질, 보완운동영역, 대상회, 두정엽, 소뇌 등의 영역이며, 운동심상 등의 상상 또는 운동모방시 이들 뇌영역이 활성화 된다(Hanakawa 등, 2003; de Lange 등, 2005). 특히 운동활성에 직접적으로 기능을 담당하는 일차운동영역(M1)에서도 운동심상에 의해 신경세포가 흥분한다(Porro 등, 2000). 운동심상은 단순히 운동을 상상하는 것 뿐

아니라, 신체의 움직임 없이 상상만으로 자신의 신체를 움직이는 것을 상상하는 복잡한 인지과정이다 (Mulder 등, 2005). Grezes와 Decety(2001)의 연구에 의하면 운동관찰, 운동심상 또는 구두지시 등의 인자를 사용하여 연구한 결과, 전운동영역과 측두엽, 후두엽, 두정엽에서 거울신경계의 신경반응이 지속적으로 나타나는 것으로 확인되었다.

실험적 조건에서 왼손이에게 땅콩을 잡는 것을 보여주었을 때 거울 신경이 반응하며, 땅콩을 스크린 뒤에 숨기고 스크린 뒤의 땅콩을 잡는 것처럼 보여 주었을 때에도 같은영역의 거울신경들이 반응한다(Rizzolatti 등, 1987). 이와는 대조적으로 땅콩을 제거하고 동일한 실험을 한 경우 이들 거울신경은 반응하지 않았다. 이러한 실험결과를 통해 볼 때 거울신경과 거울신경계는 목적지향적인 활동시 반응한다는 것이다. 거울신경 또는 거울신경계는 계획적인 행동 또는 어떠한 행동의 이해도에 따라 더욱 신경발화가 증가될 수 있다는 사실은 물리치료 임상상의 치료적 접근에 매우 중대한 근거를 제시한다. 물리치료 임상에서 치료적 중재로 적용되고 있는 목적 지향적 운동치료(goal-oriented movement therapy), 과제 지향적 운동치료(task-oriented movement therapy) 등의 치료적 접근은 거울신경계 신경활성 연구와 비교할 때 임상 치료적 근거를 다시금 고민할 수 있는 매우 유익한 과학적 근거를 제시하고 있다. 임상적으로 운동회복의 촉진을 위해 On-line(수의적 운동실행) 접근과 Off-line(운동심상, 운동관찰) 치료 시스템을 적용할 필요가 있다. 특히 스포츠 과학에서 적용되고 있는 운동심상의 경우 운동심상과정을 통한 반복적 인지훈련과정은 운동기능의 향상에 긍정적 영향을 미치고(Driskell 등, 1994), 근력 증가에도 영향을 미치는 것으로 확인되었다(Yue 등, 1992). 특히 운동심상을 적용하여 뇌졸중 환자의 기능회복 과정을 보고한 연구결과에 따르면(Page 등, 2001) 전통적인 물리치료와 운동심상을 함께 적용한 환자군에서 대조군에 비해 현저한 운동기능의 개선과 기능회복이 촉진되는 것으로 확인되었다.

관찰학습은 사람의 다양한 학습과정 중 가장 기본적이고 강력한 학습기전 중의 하나이다(Bandura, 1986). 거울신경계의 발견은 관찰학습의 기전을 설명하는 가장 획기적인 발견이다. 이러한 거울신경

계는 상대방에 의해 행해지는 행동의 이해에 가장 중요한 역할을 담당하고, 상대를 모방하고 관찰하여 학습기능이 증가한다는 것을 설명하는 가장 적절한 과학적 근거를 제공한다. 인간의 운동 시스템에서 확인된 것과 같은 거울신경들도 신경세포의 거울능력이 존재하며, 행동을 실행할 때 발생하는 신경계의 피질 내 신경회로의 연결처럼 누군가의 행동 즉 타인의 행동을 보고 관찰하는 것만으로도 이들 신경이 흥분한다. 또한 이들 거울신경계는 “행동 모방”에 의해 신경흥분이 증대되며, 이를 통해 동일한 행동의 실행시 “뇌 안에서의 준비”과정을 담당한다(Buccino 등, 2004; Vogt 등, 2003). 특히 이들 신경은 목적 지향적인 행동에만 반응하는 것으로 생각되었으나, 의미없는 수동적 움직임을 관찰하는 것만으로도 활성화되는 것으로 확인되었다(Fadiga 등, 1995).

일차운동영역과 전운동피질 및 상부 두정엽의 거울신경은 행동계획과 행동 시작을 위한 신경회로를 형성하여, 행동실행과 관찰시 반응하는 것과 더불어 운동 시도(motor intention) 및 정서와 같은 감정과 인지기능을 담당하기도 한다. 따라서 뇌졸중 재활에 있어서 환자의 생활과 밀접한 환경에서 기능적 과제를 수행하는 동영상 등을 보여주는 등의 치료환경의 제공은 거울신경의 활성을 도와주며 물리치료의 치료적 결과를 더욱 긍정적으로 개선시킬 수 있을 것이다. Buccino 등(2004)의 흥미로운 연구결과에 의하면 환자에게 6분간 손과 팔을 기능적 운동을 기록한 동영상을 보여준 후 환자에게 동영상의 내용을 흉내내도록 요구한 실험을 실시한 결과, 실험군의 경우 대조군에 비해 운동능력이 현저히 빠르게 개선되며 지속적인 추적 결과에서도 기능적 회복이 계속적으로 유지되는 것으로 확인되었다. 이러한 동영상 시청은 환자 뇌의 거울신경계를 자극하여 “운동계획”에 영향을 미치고, 결과적으로 운동기억 형성 정도에 보다 획기적인 영향을 미칠 수 있는 것을 유추할 수 있는 매우 흥미로운 결과이다.

V. 새로운 학습전략

거울신경은 행동관찰 중 특히 의미있는 목적 지향적 행동을 관찰할 때 신경반응이 나타난다. 따라

서 뇌 운동신경계는 어떤 명백한 운동을 하지 않아도 활성화될 수 있다는 결과를 얻을 수 있다. 이러한 거울신경의 신경생리학적 특성에 기인하여 임상 치료적 접근은 행동관찰(의미가 포함된), 운동심상, 운동모방 등의 새로운 치료적 접근을 시도하여 환자의 기능회복에 적극적인 치료적 접근을 시도해야 할 것이다. 환자의 기능회복을 촉진하기 위한 전통적인 개념의 물리치료와 더불어 거울신경계의 활성을 도모하는 집중적인 치료적 접근은 환자의 기능의 회복을 촉진하고, 손상된 신경회로망의 기능적 재구성을 도와주며, 운동기능의 결손을 최소화할 수 있다. 환자에게 치료적 운동의 적극적 접근으로 활동의존적 가소성이 발생한다는 것은 명확하다. 임상환경에서 급성 뇌졸중 초기 또는 운동기능 결손이 심각한 환자의 경우 적극적인 치료적 중재가 어려울 수 있다. 이때 새로운 운동학습 전략으로 “거울신경계”를 활성화 시키는 치료적 접근을 실시한다면, 환자에게 “경험 의존적 신경가소성”을 더욱 촉진할 수 있을 것이다. 치료 초기 대상 환자 치료적 접근의 제한을 극복하기 위한 거울신경 신경회로의 적극적 자극은 매우 긍정적인 치료 효과를 유도할 수 있을 것으로 생각한다. 두정-전두엽 영역의 적극적인 신경발화는 실제적인 수의적 운동을 행하지 않더라도 “행동관찰”만으로도 신경자극이 가능하며, 규칙적이고 반복적인 행동관찰 기법의 적용은 이후 환자 재활과정의 수의적 운동기능의 재구성에 어떤 방식으로든 긍정적인 영향을 미칠 수 있다. 적극적인 치료적 기회를 제공함으로써 환자의 감정 및 정서 등의 정신심리적인 측면도 긍정적인 영향을 끼치게 될 것이다. 상대방의 행동을 관찰할 때 운동신경계는 적극적으로 반응하게 되며, 관찰행동을 직접 실행할 때에는 그 행동을 실행할 때 관여하는 근육을 지배하는 피질척수로 또한 자극받게 된다(Urgesi 등, 2006). 행동관찰시 신경활성은 뇌영역의 시각처리영역(후두-측두-두정엽 회로)과 IFG와 PMv 및 IPL과 연결된다(Grezes와 Decety, 2001). 이러한 신경회로망의 연결회로의 자극은 뇌졸중 재활의 치료목표로 명확하다. 따라서 행동관찰시의 신경회로망의 동원 패턴은 수의적인 운동을 실행할 때의 뇌신경 회로의 동원 패턴과 매우 유사한 것을 알 수 있다. 거울신경 자극기법인 행동관찰로 인해 일차운동영역 안에서 운동영역

재구성이 발생되고, 새로운 운동기억 또한 형성된다(Stefan 등, 2005). 이것은 운동기억의 형성에 결정적인 역할을 담당하는 암묵기억(implicit memory)과의 관련성을 설명할 수 있을 것이다. 암묵기억은 행위나 기술 및 조작에 대한 기억으로 측두엽과 측두 내부의 해마영역이 중요한 역할을 담당한다. 그렇다면 이러한 결과는 실질적인 치료적 접근인 신체 각 부위의 치료적 접근없이 행동관찰만으로 가능할까?. Celink 등(2006)의 연구결과가 이러한 질문에 부분적인 해답을 제시한다. 이들은 정상 노년층 실험 대상군을 상대로 운동훈련 또는 행동관찰만 적용한 실험군에서는 어떠한 뇌활성 신호의 유의한 변화가 없었으나, 운동훈련과 행동관찰을 결합하여 적용한 실험군에서 새로운 운동기억 형성이 증대되고, 뇌활성 신호 또한 증가하는 것으로 확인되었다. 이들의 실험결과는 우리들 물리치료사에게 임상 치료적 근거를 제시하는 매우 결정적인 연구결과로 손색이 없다. 새로운 치료기법으로 제시되는 치료적 중재와 거울신경 활성을 도모하는 행동관찰 기법의 치료적 구성으로 환자 신체기능의 기능적 회복을 촉진할 수 있다는 치료적 근거를 제시한다. 뇌졸중 환자를 대상으로 한 동일한 방법의 연구에서도 운동훈련과 행동관찰을 동시에 적용한 환자군에서 운동기억 형성이 또한 증가되는 것을 확인하였다(Celink 등, 2008).

1. 모방-시도 관찰기법

(OTI, observation with intent to imitate)

OTI기법 적용시 두정-전두엽 거울신경과 더불어 소뇌의 신경세포들이 활성화 된다. 특히 중간전두이랑 신경들은 하향전도방식(top-down)으로 작업기억 및 운동조절 등의 기능에 관여하고 이러한 신경회로는 운동회로의 선택적 개선을 초래한다(Buccino 등, 2004). 소뇌 또한 감각정보의 통합, 협력, 운동조절 등의 기능을 담당하며, 행동관찰 시 관여하는 전방정보모델과 역행정보모델을 적극적으로 조절하는 기능을 담당한다(Arbib, 등 1998). 따라서 OTI기법의 임상 치료적 중재는 전통적인 물리치료적 접근과 결합하여 적용할 때 운동과 관련된 뇌 활성영역의 신경활성 증가에 지대한 영향을 미칠 수 있을 것이다. 운동심상은 어떤 명확한 운

동 출력없이 상상만으로 행동묘사를 하는 일종의 동적인 상태를 의미한다. 따라서 운동심상은 수의적 운동능력이 현저히 떨어지는 환자에게 운동기능의 회복을 위한 치료적 첫 단계로 적용할 수 있다. 이러한 운동심상은 초기 스포츠 심리학에서 사용하였으며, 정신훈련(상상훈련)과 직접적 훈련을 실시할 경우 운동수행력이 증대되고 운동조절능력 또한 개선되는 것으로 확인되었다(Oishi 등, 2000; Pascual-Leone 등, 1995). 운동심상으로 인한 신경활성 영역은 두정엽과 체성감각피질, 전운동영역, 대상회, 기저핵 및 소뇌에서 활성화 된다(Grezes와 Decety, 2001). 이러한 신경회로 안에서 일차운동 영역의 활성화는 운동출력의 재형성과 기능의 회복을 가장 증대한 치료적 목표로 접근하는 뇌졸중 환자의 기능적 회복을 위해 매우 중요한 근거가 된다. 최근의 연구결과 일차운동 영역은 보완운동 영역에 의해 빠르게 억제되기는 하지만 운동심상 초기에 활성화되고(Kasess 등, 2008), 결과적으로 실질적인 신체활동을 실행할 때 관여하는 해당 근육을 지배하는 피질척수로의 축진을 통한 근 활성을 유도한다(Munzert 등, 2009). 거울신경은 다양한 경험에 의해 더 발달하는 것일까?. 감각운동 경험이 적은 원숭이를 실험하였을 경우 이들 실험 원숭이의 뇌 영역에서 거울신경이 발견되지 않았으며(Rizzolatti와 Arbib, 1998), 이후 Ferrari 등(2005)의 연구결과에서는 많은 경험을 한 실험동물에서 거울신경이 더욱 많은 것으로 확인되었다. 피아니스트와 일반인을 대상으로 실험한 결과에서는 피아노치기 등의 손가락 운동을 관찰하는 동안 피아니스트의 뇌에서 거울신경 활성이 유의하게 증가되는 것을 확인하였다(Haslinger 등, 2005).

2. 모방의 신경학적 기전

모방(imitation)의 신경학적 역할을 담당하는 뇌 활성 영역은 STS(superior temporal sulcus)의 거울신경계이며, 모방의 기전에 대한 신경학적 기전에 관한 연구는 거울신경의 발견에 의해 거대한 물결이 시작되었다. 뇌 영역 F5와 PF(inferior parietal lobule)의 거울신경은 해부학적으로 서로 연결되며(Rizzolatti와 Luppino, 2001) 특히 PF의 거울신경들은 STS와 연결되어 운동 모방에 핵심적 역할을 담

당한다(Seltzer와 Pandya, 1994). 이러한 신경해부학적 특성은 인간의 행동 모방의 신경학적 기전을 설명하는 적절한 기전으로 설명 가능하며, 모방 행동의 목적을 코드화 하는 중요한 기전으로 생각할 수 있다(Koski 등, 2002). 특히 거울신경은 행동관찰시 상대방의 미래의 행동 즉 앞으로 있을 행동을 코드화하여 타인 행동의 의도를 파악하는 기능 또한 담당한다는 것을 알 수 있다(Iacoboni 등, 2005). 모방행동의 신경학적 경로의 신경정보 흐름은 두 가지 신경경로를 통해 전달된다. 두 신경전달 경로는 i) 전방정보모델(forward model; frontal mirror neuron system → parietal mirror neuron system → superior temporal sulcus)과 ii) 역행정보모델(inverse model; superior temporal sulcus → parietal mirror neuron system → frontal mirror neuron system)(Miall, 2003; Haruno 등, 2001)이 확인되었다. 운동모방기전의 전방정보 모델은 운동계획의 결과를 예측하는 역할을 담당하고, 역행정보 시스템은 모방행동의 목적을 달성하는 데 있어 필수적인 운동계획을 수정하는 조절자로 기능한다.

VI. 결론

반복된 운동학습은 활동 의존적 가소성의 개념과 유사한 방식으로 거울신경의 발달에 기여하는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 결과를 토대로 생각해 볼 때 거울신경계는 행동을 이해하는 중요한 역할을 담당하며, 행동의향 즉 행동목적 암시하는 것을 확인하는 역할을 담당한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 종합해 볼 때 치료적 목적의 치료 중재시 의도적인 목적지향성을 치료에 적용하였을 경우 더 많은 신경의 재구성을 도와주어 운동기능의 회복을 도울 수 있는 핵심적인 치료기전이라 생각할 수 있다. 특히 운동조절 과정과 정신자극 과정 등은 신경계의 연결체계가 서로 공유되는 것으로써 운동기능의 조절능력과 정신기능의 조화로운 적용이 환자치료의 효과를 더욱 증대할 수 있다는 과학적 근거를 제공한다.

참고 문헌

Arbib MA, Erdi P, Szentagothai J. Neural Organi-

- zation: Structure, Function, and Dynamics. Cambridge, MA: MIT Press; 1998.
- Bandura A. Social foundations of thought and action: A social cognitive theory. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. 1986.
- Buccino G, Lui F, Canessa M, et al. Neural circuits involved in the recognition of actions performed by nonconspecifics: An fMRI study. *J Cogn Neurosci*. 16(1):114–126. 2004.
- Buccino G, Vogt S, Ritzl A, et al. Neural circuits underlying imitation learning of hand action: an event-related fMRI study. *Neuron*. 42:323–334, 2004.
- Buccino G, Vogt S, Ritzl A, Fink GR, Zilles K, Freund HJ, Rizzolatti G. Neural circuits underlying imitation of hand actions: an event related fMRI study. *Neuron* 42:323–334, 2004.
- Buccino G, Vogt S, Ritzl A, Fink G, Zilles K, Freund H, et al. Neural circuits underlying imitation learning of hand actions: An event-related fMRI study. *Neuron*, 42, 323–334. 2004.
- Calvo-Merino B, Glaser DE, Grezes J, Passingham RE, Haggard P. Action observation and acquired motor skills: an fMRI study with expert dancers. *Cereb Cortex*. 15(8):1243–1249, 2005.
- Celnik P, Stefan K, Hummel F, Duque J, Classen J, Cohen LG. Encoding a motor memory in the older adult by action observation. *Neuroimage*. 29:677–684, 2006.
- Celnik P, Webster B, Glasser DM, Cohen LG. Effects of action observation on physical training after stroke. *Stroke*. 39:1814–1820, 2008.
- Cochin S, Barthelemy C, Roux S, Martineau J. Observation and execution of movement: similarities demonstrated by quantified electroencephalography. *Eur J Neurosci* 11:1839–1842. 1999.
- de Lange FP, Hagoort P, Toni I. Neural topography and content of movement representations. *J Cogn Neurosci*. 17:97–112, 2005.
- di Pellegrino G, Fadiga L, Fogassi L, et al. Understanding motor events: a neurophysiological study. *Exp Brain Res*. 91:176–180, 1992.
- Driskell JE, Copper C, Moran A. Does mental practice enhance performance? *J Sport Psychol*. 79:481–492, 1994.
- Ertelt D, Small S, Solodkin A, et al. Action observation has a positive impact on rehabilitation of motor deficits after stroke. *neuroimage*. 36(suppl 2): T164–T173, 2007.
- Fadiga L, Craighero L, Olivier E. Human motor cortex excitability during the perception of others' action. *Curr Opin Neurobiol*. 15(2):213–218, 2005.
- Fadiga L, Fogassi L, Pavesi G, & Fizzolatti G. Motor facilitation during action observation: A magnetic stimulation study. *Journal of Neurophysiology*, 73, 2608–2611, 1995.
- Ferrari PF, Gallese V, Rizzolatti G, Fogassi L. Mirror neurons responding to the observation of ingestive and communicative mouth actions in the monkey ventral premotor cortex. *Eur J Neurosci*. 17:1703–1714, 2003.
- Ferrari PF, Rozzi S, Fogassi L. Mirror neurons responding to observation of actions made with tools in monkey ventral premotor cortex. *J Cogn Neurosci*. 17:212–226, 2005.
- Filimon F, Nelson JD, Hagler DJ, Sereno MI. Human cortical representations for reaching: mirror neurons for execution, observation, and imagery. *Neuroimage*. 37(4):1315–1328, 2007.
- Gallese V, Fadiga L, Fogassi L, Rizzolatti G. Action recognition in the premotor cortex. *Brain*. 119(pt 2):593–609, 1996.
- Grezes J, Decety J. Functional anatomy of execution, mental simulation, observation and verb generation of actions: a meta-analysis. *Hum Brain Mapp*. 12:1–19, 2001.
- Hanakawa T, Immisch I, Toma K, Dimyan MA, Van Gelderen P, Hallett M. Functional properties of brain areas associated with motor execution and imagery. *J Neurophysiol*. 89: 989–1002, 2003.

- Haruno M, Wolpert DM, Kawato M. Mosaic model for sensorimotor learning and control. *Neural Comput.* 13:2201–2220, 2001.
- Haslinger, B, et al. Transmodal sensorimotor networks during action observation in professional pianists. *Journal of Cognitive Neuroscience.* 17: 282–293, 2005.
- Hendricks HT, van Limbeek J, Geurts AC, Zwarts MJ. Motor recovery after stroke: a systematic review of the literature. *Arch Phys Med Rehabil.* 83:1629–1637, 2002.
- Jackson PL, Lafleur MF, Malouin F, Richards C, Doyon J. Potential role of mental practice using motor imagery in neurologic rehabilitation. *Arch Phys Med Rehabil.* 82:1133–1141, 2001.
- Kasess CH, Windischberger C, Cunningham R, Lanzenberger R, Pezawas L, Moser E. The suppressive influence of SMA on MI in motor imagery revealed by fMRI and dynamic causal modeling. *Neuroimage.* 40:828–837, 2008.
- Kohler E, Keysers C, Umiltà MA, et al. Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science.* 297:846–848, 2002.
- Koski L, Wohlschlagel A, Bekkering H, Woods RP, Dubeau MC, Mazziotta JC, Iacoboni M. Modulation of motor and premotor activity during imitation of target-directed actions. *Cereb Cortex.* 12:847–855, 2002.
- Iacoboni M, Molnar-Szakacs I, Gallese V, Buccino G, Mazziotta JC, Rizzolatti G. Grasping the intentions of other with one's own mirror neuron system. *PLoS Biol.* 3:e79, 2005.
- Miall RC. Connecting mirror neurons and forward models. *NeuroReport.* 14:2135–2137, 2003.
- Mulder T, de Vries S, Zijlstra S. Observation, imagination and execution of an effortful movement: more evidence for a central explanation of motor imagery. *Exp Brain Res.* 163:344–351, 2005.
- Munzert J, Lorey B, Zentgraf K. Cognitive motor processes: the role of motor imagery in the study of motor representations. *Brain Res Rev.* 60:306–326, 2009.
- Oishi K, Kasai T, Maeshima T. Autonomic response specificity during motor imagery. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci.* 19:255–261, 2000.
- Page SJ, Levine P, Sisto S, Johnston MV. A randomized efficacy and feasibility study of imagery in acute stroke. *Clin Rehabil.* 15:223–240, 2001.
- Page SJ. Mental practice: a promising restorative technique in stroke rehabilitation. *Top Stroke Rehabil.* 8:54–63, 2001.
- Pascual-Leone A, Dang N, Cohen LG, Brasilneto JP, Cammarota A, Hallett M. Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor-skills. *J Neurophysiol.* 74:1037–1045, 1995.
- Porro CA, Cettolo V, Francescato MP, Baraldi P. Ipsilateral involvement of primary motor cortex during motor imagery. *Eur J Neurosci.* 12: 3059–3063, 2000.
- Rizzolatti G, Craighero L. The Mirror Neuron System. *Annual Rev Neurosci* 27:169–192, 2004.
- Rizzolatti G, Craighero L. The mirror-neuron system. *Annu Rev Neurosci.* 27:167–192, 2004.
- Rizzolatti G, Craighero L. The mirror-neuron system. *Annu Rev Neurosci.* 27:169–192, 2004.
- Rizzolatti G, Fogassi L, Gallese V. Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nat Rev Neurosci* 2:661–670, 2001.
- Rizzolatti G, Gentilucci M, Fogassi L, Luppino G, Matelli M, Ponzoni-Maggi S. Neurons related to goal-directed motor acts in inferior area 6 of the mecaque monkey. *Exp Brain Res* 67: 220–224, 1987.
- Rizzolatti G, Luppino G, Matelli M. The organization of the cortical motor system: new concepts. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 106:283–296, 1998.
- Rizzolatti G, Luppino G, Matelli M. The organi-

- zation of the cortical motor system: new concepts. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 106(4):283–296, 1998.
- Rizzolatti G, Luppino G. The cortical motor system. *Neuron* 31:889–901, 2001.
- Rizzolatti, G, Arbib, M.A. Language within our grasp. *Trends in Neurosciences* 21: 188–194, 1998.
- Seltzer B, Pandya DN. Parietal, temporal, and occipital projections to cortex of the superior temporal sulcus in the rhesus monkey: a retrograde tracer study. *J Comp Neurol*, 343: 445–463, 1994.
- Stefan K, Classen J, Celnik p, Cohen LG. Concurrent action observation modulates practice–induced motor memory formation. *Eur J Neurosci.* 27(3):730–738, 2008.
- Stefan K, Cohen LG, Duque J, et al. Formation of a motor memory by action observation. *J Neurosci.* 25:9339–9346, 2005.
- Urgesi C, Moro V, Candidi M, Aglioti SM. Mapping implied body action in the human motor system. *J Neurosci.* 26:7942–7949, 2006.
- Vogt, S, Taylor, P, & Hopkins, B. Visuomotor priming by pictures of hand postures: perspective matters. *Neuropsychologia*, 41, 941–951. 2003.
- Yue G, Cole KJ. Strength increases from the motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions. *J Neurophysiol* 67:1114–1123, 1992.