

관찰 자극의 친숙도에 따른 뇌졸중 환자의 뮤리듬 변화

윤태원 · 이문규*

씨티재활병원 재활치료센터

The Change of Mu Rhythm according to Familiarity of Observation Stimulus in Stroke Patients

Tae-Won Yun, PT, MSc; Moon-Kyu Lee, PT, PhD*

Gwangju City Rehabilitation Hospital

ABSTRACT

Purpose : The aims of this study was to identify changes mu rhythm according to familiarity with a stimulus in people with stroke.

Methods : Seventeen right-handed participants were asked to observe 2 different stimulus; a non-familiarity stimulus condition (NFSC), and a familiarity stimulus condition (FSC). Electroencephalogram (EEG) signals from electrodes on the participant's scalp were recorded during action observation. The activation of the mirror neuron system was compared between FSC and NFSC by a paired t-test. An independent t-test was used to compare the difference between right and left hemispheres for the activation of the mirror neuron system during action observation of performing a task with the right hand.

Results : The result of paired t-test showed no significantly difference between NFSC and FSC in the activation of the mirror neuron system. The Result of independent t-test also showed no significantly difference in the activation of mirror neuron system between the right and left hemispheres.

Conclusion : The familiarity with a stimulus had no significant effect on the activation of the mirror neuron system according to the familiarity and in either the right or left hemispheres in people with chronic stroke.

Key Words : Familiarity, Mirror neuron system, Mu rhythm, Stroke

I. 서 론

인간은 사회적 동물이며 사회적 상호작용은 인간의 필수적인 기능이다. 다른 사람의 동작을 이해하고 그 동작을 모방하는 능력은 인간의 사회적 인지의 주요 요소이다. 신경 손상은 동작모방, 동작이해, 마음이론, 감정, 주의집중, 언어능력과 같은 사회적 능력 및 의사소통 능력 결손을 초래한다.

인간이 다른 사람의 동작을 모방하고 동작을 이해하는 데에는 지각-동작(perception-action) 결합능력이 필요하며 그 신경학적 기전이 바로 거울신경세포 시스템이라고 여기고 있다(Virji-Babul 등, 2008). 거울신경세포 시스템이 포함된 광범위한 네트워크는 환경에 대한 지각을 감각운동 투사 영역에 대응시킴으로써, 행동 지각에서 감정에 이르는 다양한 측면의 사회적 인지 및 의사소통에 관여하는 것으로 여기고 있다(Iacoboni과 Dapretto, 2006).

거울신경세포는 원숭이의 운동앞겉질인 F5영역에서 처음 발견되었다. 이 세포들은 원숭이가 특정 동작을 직접 수행할 때나 유사한 동작을 하는 행위자를 관찰할 때 모두 발화하는 특징이 있다(Petrosini 등, 2003). 관찰한 동작이 관찰자가 그 동작을 수행할 때 관여하는 운동 시스템이 운동 투사영역에 거울에서 비친 것처럼 투사되기에 거울신경세포(mirror neuron)라고 명명하였다(Buccino 등, 2006).

거울신경세포 시스템이 인간에서도 존재한다는 근거들이 많은 연구들을 통해 입증되었다(Fabbri-Destro와 Rizzolatti, 2008; Schulte-Ruther 등, 2007). 인간에서 거울신경세포 시스템의 위치를 규명한 연구들에 따르면, 인간의 거울신경세포 시스템은 입쪽아래마루소엽 부분(rostral part of the inferior parietal lobule), 중심앞이랑의 아래쪽 부분(lower part of the precentral gyrus)에 존재한다(Rizzolatti와 Craighero, 2004). 인간의 거울신경세포 시스템은 관찰한 동작 관찰(Grafton 등, 1996), 동작 이해(Rizzolatti 등, 2009), 동작과 관련된 소리(Tettamanti 등, 2005)에 의해 활성화될 뿐만 아니라 흉내내기 동작(Buccino 등, 2001)에 반응하는 것으로 알려져 있다.

최근 Calvo-Merino 등(2005)의 연구에 따르면 관찰한 동작의 친밀도와 전문성은 거울신경세포가 포함되었다고 생각되는 겹질 영역들을 활성화시킨다. 또 다른 연구에서는 대상자 자신의 얼굴이 포함된 친숙한 얼굴과 낯선 얼굴을 대상자들에게 보여준 결과 아래이마이랑(inferior frontal gyrus) 영역이 두드러지게 활성화되었다고 보고하였다(Kircher 등, 2001). 따라서 거울신경세포 시스템은 관찰 중인 동작의 운동학적 친밀도뿐만 아니라 실행하고 있는 사람에 특이적으로 활성화되는 것으로 생각된다.

자극의 친숙함에 관한 연구에서 처음 본 얼굴에 비해 친숙한 얼굴을 보았을 때 자폐증 아동의 뇌 영역이 보다 강하게 활성화되었다(Pierce 등, 2004). 또한 자폐증 아동들을 대상으로 한 연구에서는 낯선 자극, 즉 낯선 사람이 하는 동작을 관찰할 때 무리듬 억제가 나타나지 않았다고 보고하였다(Bernier 등, 2007 Oberman 등, 2005). 또한 한 연구에서는 전문 피아노 연주자와 일반인들을 대상으로 피아노를 연주하는 손가락 움직임을 관찰하는 동안 활성화되는 뇌영역을 관찰한 결과, 전문 피아노 연주자들의 거울신경세포 시스템이 일반인군에 비해 더욱 강하게 활성화하였다(Haslinger 등, 2005). 이는 관찰하는 자극의 친밀도에 따라 거울신경세포 시스템의 활성화도가 달라질 수 있다는 것으로 해석할 수 있다.

이 거울신경세포 시스템의 활성화는 뇌전도(electroencephalographic, EEG)를 이용하여 무리듬을 통해 확인할 수 있다. 무리듬은 감각운동겉질 영역에서 발생하는 8-13 Hz의 주파수로 움직임을 실행하거나 상상할 때 억제된다(Oberman 등, 2005). 무리듬 억제는 인간 거울신경세포 시스템의 지표로 알려져 있다. 한 연구에서는 대상자들이 정지된 물체를 보는 동안에는 뮤 억제 가 나타나지 않았지만 동작을 하거나 물건을 잡고 있는 자세를 관찰할 때는 뮤 억제가 나타났다고 하였다(Perry와 Bentin, 2009). 이 연구는 뮤 억제와 인간의 거울신경세포 시스템 사이의 관계에 대한 근거를 제공하는 것이며 뮤 리듬이 거울신경세포의 특성과 유사하다는 것을 입증하는 것이다. 또한 배쪽운동앞겉질과 뮤 리듬이 발생하는 일차감각운동겉질 사이에는 겹질-겹질 신경

로 연결되어 있다는 해부학적, 생리학적 근거들이 제시되어 거울신경세포 활동의 지표로 뮤 억제를 사용하는 것은 타당성이 있다(Nishitani와 Hari, 2000 Petrosini 등, 2003). 또한 이 유리듬 억제 정도는 관찰자가 화면에 나오는 사람과 동작을 인지하는 정도에 따라 다르다고 추측해 볼 수 있다.

본 연구의 목적은 친밀도가 뇌졸중환자들의 유리듬 변화에 미치는 영향을 알아보는 것이다. 유리듬은 거울신경세포 시스템의 지표로 사용되기 때문에 유리듬의 변화는 거울신경세포 시스템의 활성도로 간주하였다. 자극의 친밀도에 따른 유리듬의 변화를 알아보기 위해 본 연구에서는 친밀한 자극과 그렇지 않은 자극을 위해 본 연구에서 친숙한 사람과 낯선 사람이 하는 동작을 관찰하도록 하였다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상

본 연구의 대상자들은 광주광역시 C 병원에 입원한 만성 뇌졸중 환자들이었다. 뇌졸중으로 진단받은 지 6개월 이상 경과한 자, 두개골 적출 수술을 받지 않은 자, 우세손이 오른손인 자를 대상으로 선정하였다. 심각한 우울증이 있는 자와 MMSE-K (mini-mental status examination-Korean) 점수가 23점 이하인 사람은 대상자에서 제외하였다. 모든 대상자들은 실험 과정에 대한 설명을 듣고 실험 참가에 동의하였다.

2. 연구 설계

1) 뇌파 측정장비

세 조건의 화면과 동영상을 관찰할 때 발생하는 뇌파는 QEEG-8 (LXE3208, LAXTHA Inc., Korea)를 사용하여 측정하였다. 뇌파 자료는 두피에 부착한 8개의 전극을 통해 수집하였다. 각 대상자들의 뇌파는 256 Hz 샘플링 주파수, 0.5~50 Hz의 통과필터, 12-bit AD변환을 통해 컴퓨터에 저장되었다.

국제 10-20 전극 배치법(International 10-20 method

of electrode placement)을 이용하여 전극을 부착할 부위를 정하였다(그림 1). 전극의 저항을 줄이기 위해 측정부위를 알코올 솜으로 닦아냈다. 닦은 부위의 알코올이 증발된 후, Ag/AgCl 전극용 겔을 이용하여 F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2에 자료 수집용 전극을 부착하였고 접지전극은 양쪽 귀 뒤쪽에 부착하였다.

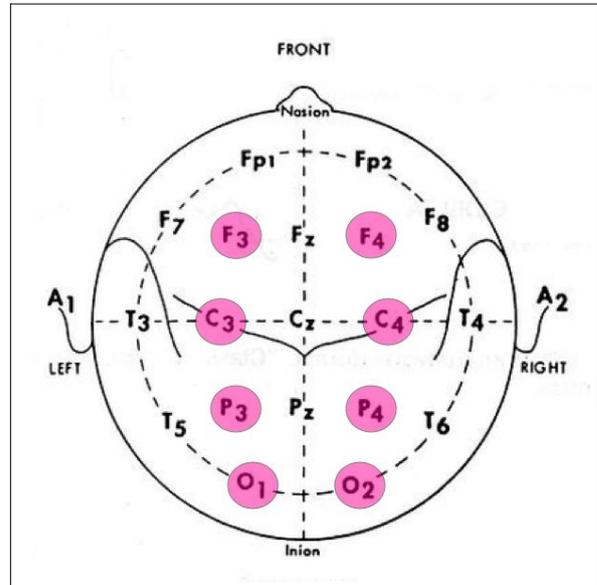


그림 1. 국제 10-20 전극배치법에 따른 전극부착부위

2) 동작관찰 동영상

대상자들에게 모두 3가지 조건의 화면을 제시하였다. 먼저, 기초선 조건은 흰색 화면이었다. 비친숙자극조건은 동작관찰조건으로, 화면상의 배우가 오른손을 이용해 물통으로 3개의 컵에 물을 따르는 동영상이었다. 비친숙자극조건에서는 화면상의 배우 얼굴이 나오지 않고 배우의 팔만 관찰할 수 있었다. 친숙자극조건은 친숙한 사람의 동작관찰조건으로, 대상자들이 배우의 얼굴을 관찰할 수 있도록 초기 5초 동안 배우의 얼굴이 보이도록 한 후 점차 동작을 수행하는 팔로 화면을 이동시켰다(친숙자극조건). 이 조건에서 나오는 배우는 대상자들이 잘 아는 사람이었기 때문에 대상자들은 얼굴 다음에 나오는 팔이 잘 아는 사람의 팔 동작이라는 것을 인지할 수 있었다. 각 조건의 영상 관찰 시간은 각각 80초였으며 각 조건 간 쉬는 시간은 30초였다.

3) 측정 절차

측정에 앞서, 대상자들에게 실험 절차와 주의사항에 설명하였다. 먼저 대상자들의 머리에 뇌파 전극을 부착하고 25인치 컴퓨터 화면 앞에 앉도록 하였다. 대상자들은 편안히 앉아 25인치 화면을 통해 각 조건의 화면과 동영상을 관찰하였다. 동영상을 관찰 동작을 관찰하는 동안에는 움직이지 않도록 움직임을 최대한 통제하였다. 각 대상자들이 관찰하는 화면의 관찰 순서는 무작위로 하였다.

4) 뇌파 자료 변환

각 조건별로 80초 동안 뇌파 신호를 수집하였으며, 시작과 끝 부분의 10초씩을 각각 제거하여 각 조건당 60초의 뇌파 자료를 만들었다. 뇌파의 디지털 변환과 분석은 TeleScan 프로그램(LAXTHA Inc., Korea)을 이용하여 처리하였다. 컴퓨터로 전송된 신호는 뇌파 분석 전문가가 분석하였다.

감각운동결절 부위의 발생하는 뮤리듬 억제(mu suppression)는 거울신경세포 시스템의 지표로 사용된다(Oberman 등, 2005). 본 연구에 필요한 뇌파는 감각운동결절에 해당되는 C3와 C4 부위에서 얻은 뮤리듬(mu rhythm)이므로 본 연구에서는 C3와 C4에서 얻은 자료만을 분석하였다. C3와 C4 부위에서 얻은 절대 뮤파워(absolute mu power)를 기초선 조건에 대한 각 조건의 절대 뮤파워비(mu power ratio)로 전환하고 이를 로그변환하였다. 로그비(log ratio)가 0보다 작으면 뮤리듬 억제를 나타내며, 0보다 크면 뮤리듬 증가를, 0이면 억제가 없음을 나타낸다.

3. 자료분석

비친속자극조건과 친속자극조건 동작관찰 시, MNS 활성화를 비교하기 위해 C3와 C4의 전극에서 수집한 뮤리듬 로그비를 비교하였다. 비친속자극조건과 친속자극조건의 뮤리듬 로그 비는 짝비교 t-검정을 이용하여 비교하였다. 각 조건에서 손동작관찰 시, 좌뇌반구와 우뇌반구의 뮤리듬 로그비를 비교해보기 위해 C3와 C4에서 얻은 뮤리듬 로그 비를 독립 t-검정으로 분석하였

다. 모든 분석은 통계 분석 프로그램인 SPSS for Window 17.0을 이용하여 분석하였다. 통계학적 유의수준 $\alpha=0.05$ 로 정하였다.

III. 연구 결과

1. 연구대상자의 일반적 특성

본 연구대상자의 일반적 특성은 표 1과 같다. 연구대상자는 만성 뇌졸중 환자 17명(남자 10명, 여자 7명)이었다. 평균 나이는 62.41세였으며, 평균 유병기간은 15.29개월이었다. 뇌졸중 유형은 뇌출혈이 6명, 뇌경색이 11명이었고, 마비부위는 오른쪽이 7명, 왼쪽이 10명이었다.

표 1. 대상자 일반적 특성 (N=17)

일반적 특성		대상자
성별	남자	10
	여자	7
병변 부위	오른쪽	7
	왼쪽	10
유병기간(개월)		^a 15.29±17.27
연령(세)		^a 62.41±8.83

^a: 평균±표준편차

2. 조건별 뮤리듬 로그비 비교

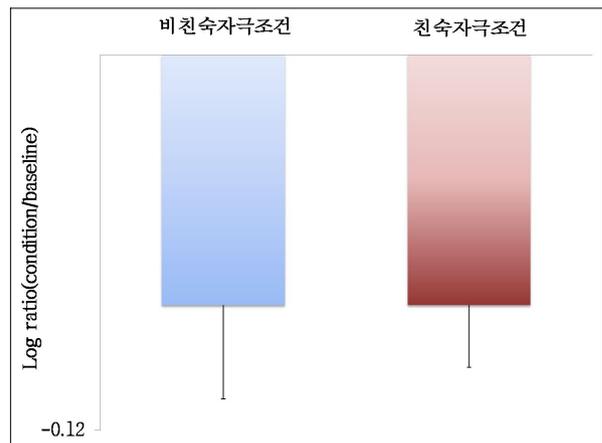


그림 2. 비친속자극조건과 친속자극조건에서 뮤리듬의 변화

비친숙자극조건의 유리듬 로그비 평균은 $-.08 \pm .11$ 이었고, 친숙자극조건의 유리듬 로그비는 $-.08 \pm .08$ 이었다. 비친숙자극조건과 친숙자극조건 관찰 시, MNS 활성화 지표인 유리듬 로그비의 조건 간 차이를 비교한 결과, 비친숙자극조건과 친숙자극조건 두 조건 간에는 유의한 차이가 없었다($p > .05$) (그림 2).

3. 비친숙자극조건 동작관찰 시, C3와 C4 영역의 유리듬 로그비 비교

비친숙자극조건 동작관찰 시, 대뇌반구간 유리듬 로그비는 C3 영역이 $-.08 \pm .12$ 이었고, C4 영역은 $-.08 \pm .12$ 이었다. 비친숙자극조건 동작관찰 시, 대뇌반구간의 차이를 알아보기 위해 C3과 C4 영역에서 얻은 유리듬 로그비를 비교한 결과 두 영역 사이에는 유의한 차이가 없었다($p > .05$) (그림 3).

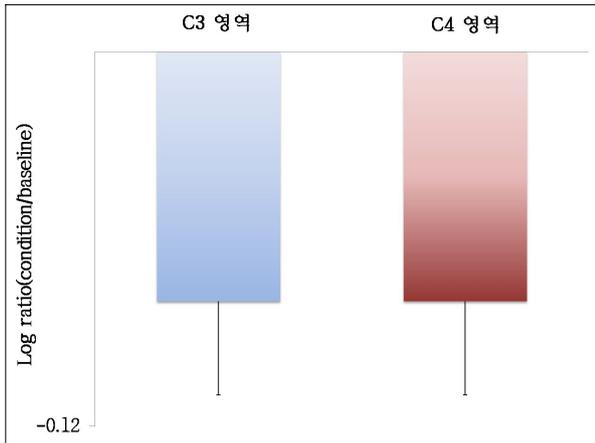


그림 3. 비친숙자극조건 동작관찰 시 대뇌반구간 유리듬의 변화

4. 친숙자극조건 동작관찰 시, C3와 C4 영역의 유리듬 로그비 비교

친숙자극조건 동작관찰 시, 유리듬 로그비는 C3 영역이 $-.06 \pm .09$ 이었고, C4 영역은 $-.09 \pm .1$ 이었다. 친숙자극조건 동작관찰 시, 대뇌반구간의 차이를 알아보기 위해 C3와 C4 영역에서 얻은 유리듬 로그비를 비교한 결과 두 영역 사이에는 유의한 차이가 없었다

($p > .05$) (그림 4).

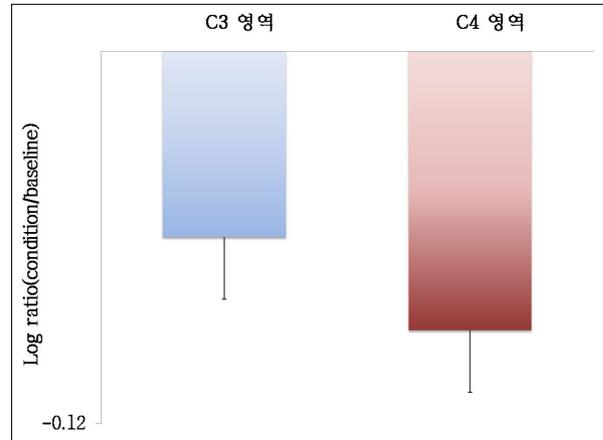


그림 4. 친숙자극조건 동작관찰 시 대뇌반구간 유리듬의 변화

IV. 고 찰

본 연구 결과, 뇌졸중 환자를 대상으로 친숙한 사람의 동작을 관찰하는 조건과 낯선 사람의 동작을 관찰하는 조건에서 거울신경세포 시스템 활성화의 차이는 없었다.

일반인에게 영상을 보도록 한 후 평소 자신이 사용하던 카드의 로고와 사용하지 않는 카드의 로고를 관찰하게 하여 거울신경세포 시스템 활성화를 비교하였다 (Jacoboni, 2008). 그 결과 자신에게 친숙한 카드의 로고를 관찰하는 동안 거울신경세포 시스템 활성화가 더욱 강하게 나타났다. 또한 전통 발레 무용가와 카포에라(Capoeira) 전문가들이 발레와 카포에이라 동작을 관찰하도록 하여 활성화되는 뇌영역을 확인하였다. 그 결과 대상자에게 친숙한 자극을 관찰하는 동안 운동앞걸질, 마루엣걸질을 포함하는 거울신경세포 시스템 영역들이 더 강하게 활성화되었다 (Calvo-Merino 등, 2005). 또 다른 연구에서는 전문 피아노 연주자와 일반인들을 대상으로 피아노를 연주하는 손가락 움직임을 관찰하는 동안 전문 피아노 연주자들의 거울신경세포 시스템이 일반인에 비해 더욱 강하게 활성화하였다 (Haslinger 등, 2005). 이 연구들은 친숙한 자극에 거울신경세포 시스템이 더 강하게 활성화된다는 사실을 뒷받침한다.

Oberman 등(2008)의 연구에서 형제, 자매, 부모님이 수행하는 동작을 관찰하는 조건과 손만 나오는 동작을 관찰하는 조건 사이에서 거울신경세포 시스템의 활성화를 비교하였다. 연구 결과, 손만 나오는 동작을 관찰하는 조건에 비해 친숙한 사람의 동작을 관찰하는 조건에서 거울신경세포 시스템이 더욱 강하게 활성화되었다. Desy와 Theoret(2007)은 24명의 대상자를 각각 12명의 백인과 흑인으로 나눈 후 손 동작관찰 시 거울신경세포 시스템의 활성화를 비교하여 관찰한 동작이 친숙한 동작일 경우 거울신경세포 시스템 영역이 더욱 강하게 활성화되었으며, 관찰자와 다른 피부색을 갖고 있는 손동작 관찰 시 같은 피부색을 갖고 있는 손동작 관찰 시 보다 강하게 활성화되는 것을 관찰하였다. 이는 동작관찰 시 거울신경세포 시스템의 활성화는 운동학적 친밀도와 관련되어 있다고 추측할 수 있고, 기존 연구와는 다르게 친숙한 자극에 비해 낯선 자극에 대해 더 강하게 활성화된다는 것을 말해준다. 그러나 만성 뇌졸중 환자를 대상으로 한 본 연구에서는 자극의 친숙함에 따라 거울신경세포 시스템 활성화 차이가 없는 것으로 나타났다.

동작을 관찰하는 동안 관찰자들이 바라보는 관점에 따라 대뇌반구 간 거울신경세포 시스템 활성화도는 변화한다(Kilner 등, 2009). Kilner 등(2009)은 일반인들이 화면에서 오른손이 움직이는 영상을 관찰하는 동안 양쪽 대뇌반구의 거울신경세포 시스템 활성화도에 차이가 있음을 보고하였다. 또 다른 연구에서는 3인칭 관찰 시점에서 오른손으로 수행하는 동작을 관찰하는 동안 오른쪽 대뇌반구의 마루소엽에서 강하게 활성화되었다(Shmuelof와 Zohary, 2008). 이는 관찰하고 있는 손에 따라 대뇌반구 간 활성화 차이가 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 최근 연구에서는 오른손이 우세손인 일반인을 대상으로 오른손과 왼손으로 움직이는 동작을 관찰하여 뇌 활성화를 살펴보았다(Press 등, 2011). 연구 결과, 동작을 관찰하는 동안 왼쪽 대뇌반구에서 활성화가 더 강하게 나타났다. 이는 관찰자의 우세손인 오른손으로 해당 과제를 실행하는데 필요한 운동 프로그램을 관찰을 통해 실행시키는 것으로 판단할 수 있다.

동작관찰 시 한쪽 대뇌반구에서만 활성화하는 것이 아니라 양쪽 대뇌반구에서 모두 거울신경세포 시스템이 활성화된다고 보고한 연구가 있다. 윤태원과 이문규(2011)는 뇌졸중 환자를 대상으로 동작관찰 시 양쪽 대뇌반구 사이의 활성화 차이는 없다고 하였다. 또한 Buccino 등(2001)의 연구에서는 정상인을 대상으로 입, 손, 팔 동작을 관찰하는 동안 거울신경세포 시스템의 활성화 부위를 알아보았다. 연구 결과, 입, 손, 팔 동작을 관찰하는 동안 각각의 조건에 따라 활성화 부위가 각기 달랐으나 모든 조건들에서 양측 대뇌반구가 모두 활성화된 것으로 나타났다. 이는 동작 관찰 시 양쪽 대뇌반구의 거울신경세포 시스템이 모두 활성화된 본 연구 결과와 동일한 결과이다.

본 연구에서는 친숙한 사람이 수행하는 동작을 관찰하게 한 후 거울신경세포 시스템의 활성화를 살펴보았고, 동작을 관찰하는 동안 대뇌반구 간 거울신경세포 시스템의 활성화 차이를 비교하였다. 그러나 이 친숙함에 대해 정확히 규정하기가 어렵고, 친숙함의 정도를 수치화하여 객관적인 자료로 제시하기도 어렵다는 제한점이 있었다. 추후 연구에서는 이러한 점을 보완해야 할 필요가 있을 것이다. 또한 오른손이 우세손인 남성과 여성에 따른 거울신경세포 시스템의 활성화 차이를 비교하여 동작관찰 시 거울신경세포 시스템에 영향을 주는 요인을 살펴보아야 할 것이다.

V. 결 론

성인 뇌졸중 환자들을 대상으로 친숙한 사람이 수행하는 동작에 따른 거울신경세포 시스템 활성을 비교한 결과, 친숙함에 따른 활성화의 차이는 없었고 동작관찰 시 양쪽 대뇌반구에서 모두 활성화되었다. 이는 뇌졸중 환자에게 거울신경세포 시스템은 자극의 친숙함에 영향을 받지 않는 것으로 판단되고, 오른손이 우세손인 대상자에게 오른손으로 수행하는 동작을 관찰하는 동안 대뇌반구 간 거울신경세포 시스템의 활성화 차이는 없는 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 윤태원, 이문규. 동작관찰 시 뇌졸중 환자의 무리듬 변화. *대한물리의학회지*. 6(3):361-368, 2011.
- Bernier R, Dawson G, Webb S et al. EEG mu rhythm and imitation impairments in individuals with autism spectrum disorder. *Brain Cogn*. 64(3):228-237, 2007.
- Buccino G, Binkofski F, Fink GR et al. Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *Eur J Neurosci*. 13(2):400-404, 2001.
- Buccino G, Solodkin A, Small SL. Functions of the mirror neuron system: implications for neurorehabilitation. *Cogn Behav Neurol*. 19(1):55-63, 2006.
- Calvo-Merino B, Glaser DE, Grezes J et al. Action observation and acquired motor skills: an fMRI study with expert dancers. *Cereb Cortex*. 15(8):1243-1249, 2005.
- Desy MC, Theoret H. Modulation of motor cortex excitability by physical similarity with an observed hand action. *PLoS One*. 2(10):e971, 2007.
- Fabbri-Destro M, Rizzolatti G. Mirror neurons and mirror systems in monkeys and humans. *Physiology (Bethesda)*. 23:171-179, 2008.
- Grafton ST, Arbib MA, Fadiga L et al. Localization of grasp representations in humans by positron emission tomography. *Exp Brain Res*. 112(1):103-111, 1996.
- Haslinger B, Erhard P, Altenmüller E et al. Transmodal sensorimotor networks during action observation in professional pianists. *J Cogn Neurosci*. 17(2):282-293, 2005.
- Iacoboni M. *Mirroring people: the new science of how we connect with others*. Farrar, Straus and Giroux. 2008.
- Iacoboni M, Dapretto M. The mirror neuron system and the consequences of its dysfunction. *Nat Rev Neurosci*. 7(12):942-951, 2006.
- Kilner JM, Marchant JL, Frith CD. Relationship between activity in human primary motor cortex during action observation and the mirror neuron system. *PLoS One*. 4(3):e4925, 2009.
- Kircher TT, Senior C, Phillips ML et al. Recognizing one's own face. *Cognition*. 78(1):B1-B15, 2001.
- Nishitani N, Hari R. Temporal dynamics of cortical representation for action. *Proc Natl Acad Sci USA*. 97(2):913-918, 2000.
- Oberman LM, Hubbard EM, McCleery JP et al. EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders. *Brain Res Cogn Brain Res*. 24(2):190-198, 2005.
- Oberman LM, Ramachandran VS, Pineda JA. Modulation of mu suppression in children with autism spectrum disorders in response to familiar or unfamiliar stimuli: the mirror neuron hypothesis. *Neuropsychologia*. 46(5):1558-1565, 2008.
- Perry A, Bentin S. Mirror activity in the human brain while observing hand movements: A comparison between EEG desynchronization in the μ -range and previous fMRI results. *Brain Research*. 1282(0):126-132, 2009.
- Petrosini L, Graziano A, Mandolesi L et al. Watch how to do it! New advances in learning by observation. *Brain Res Brain Res Rev*. 42(3):252-264, 2003.
- Pierce K, Haist F, Sedaghat F et al. The brain response to personally familiar faces in autism: findings of fusiform activity and beyond. *Brain*. 127(Pt 12):2703-2716, 2004.
- Press C, Cook J, Blakemore SJ et al. Dynamic modulation of human motor activity when

- observing actions. *The Journal of Neuroscience*. 31(8):2792–2800, 2011.
- Rizzolatti G, Craighero L. The mirror–neuron system. *Annu Rev Neurosci*. 27:169–192, 2004.
- Rizzolatti G, Fabbri–Destro M, Cattaneo L. Mirror neurons and their clinical relevance. *Nature Clinical Practice Neurology*. 5(1):24–34, 2009.
- Schulte–Ruther M, Markowitsch HJ, Fink GR et al. Mirror neuron and theory of mind mechanisms involved in face–to–face interactions: a functional magnetic resonance imaging approach to empathy. *J Cogn Neurosci*. 19(8):1354–1372, 2007.
- Tettamanti M, Buccino G, Saccuman MC et al. Listening to action–related sentences activates fronto–parietal motor circuits. *J Cogn Neurosci*. 17(2):273–281, 2005.
- Virji–Babul N, Moiseev A, Cheung T et al. Changes in mu rhythm during action observation and execution in adults with Down syndrome: implications for action representation. *Neurosci Lett*. 436(2):177–180, 2008.
-