

## 실행증의 신경해부학 기초

KAIST 바이오및뇌공학과

정 용

### Neuroanatomical Basis of Apraxia

Yong Jeong, M.D., Ph.D.

Department of Bio and Brain Engineering, KAIST

Apraxia is a cognitive disorder in which the patient is not able to carry out learned, skilled movement despite preserved motor and sensory system, coordination, comprehension, and cooperation. Several types of apraxia have been postulated according to the involved body part (buccofacial apraxia, limb apraxia) or to the pathophysiology (ideational apraxia, ideomotor apraxia etc.) The main brain lesions for apraxia include left parietal, frontal cortex, their underlying white matter, corpus callosum and some subcortical structures. In this review, the anatomical substrates for apraxia based on underlying physiological mechanism will be discussed. (**Brain & NeuroRehabilitation 2009; 2: 57-63**)

**Key Words:** apraxia, motor learning, neural correlates, tool use

## 서 론

실행증이란 대뇌의 운동 프로그램의 장애로 인하여 발생하는, 반복 학습되어 능숙한 운동이나 몸짓(gesture)에 대한 장애를 말한다. 예를 들어, 가위질 하는 흉내를 시켰을 때, 이를 잘 하지 못하는 것을 말한다. 단, 이 장애가 마비(paralysis), 운동기능감소증(akinesia 또는 hypokinesia), 감각이상, 이상운동, 부조화(incoordination), 알아듣기의 장애, 비협조 때문이 아니어야 한다.<sup>1</sup> 즉, 고위인지기능의 하나로서 운동기능의 장애를 의미한다. 실행증은 그 자체로 일상생활의 장애를 가져오는 주요 증상이 되므로 재활 의학적으로 중요 치료 목표가 된다.<sup>2</sup> 이외에도 실행증은 피질기저핵변성(corticobasal degeneration) 등 운동질환에서도 나타나는 주요 증상이므로 의심되는 환자에게서 확인하는 것이 매우 중요하다.<sup>3</sup> 또한 실행증은 인류가 두발 보행으로 인해 자유로워진 손의 사용 및 복잡한 도구 사용과 관련되어 나타난다고 볼 수 있어<sup>4</sup> 뇌의 진화와 관련된 연구에 중요한 단서를 제시한다. 본 글에서는 실행증과 관련된 신경해부학적 구조와 이의 이론적 배경을 뇌손상 환

자 및 기능영상 연구의 결과를 바탕으로 설명하고자 한다.<sup>5-8</sup>

## 본 론

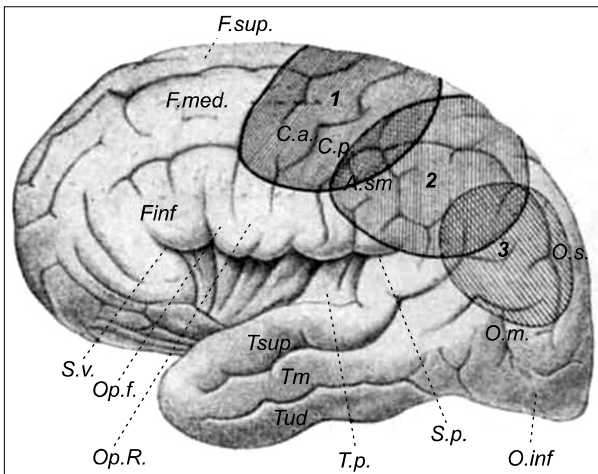
### 1) 실행증 개념의 역사적 고찰 및 분류

실행증의 현대적인 개념과 구분은 Liepmann<sup>9-12</sup>에 의해 제시되었다. 그는 움직임에 대한 시간, 공간적인 정보(movement formulae)가 좌반구 뒷부분에 저장되어 있고 이것이 신경연결 양식(innervatory pattern)이 저장되어 있는 전두엽과 연결되며 이 과정의 장애시 실행증이 나타난다고 보았다. 이를 기반으로 Liepmann은 사지실행증을 관념실행증(ideational apraxia), 관념운동실행증(ideokinetic apraxia = ideomotor apraxia), 사지운동실행증(limb kinetic apraxia)으로 구분하였다. Fig. 1에서와 같이 Liepmann은 운동 프로그램이 주로 좌반구 측두-두정-후두엽이 만나는 부위(TPO junction)에서 있어 중앙의 일차감각-운동 영역으로 전달된다고 보았다. 뒷부분(Fig. 1의 3부위)의 병변시 관념실행증이 나타나며, 두정엽 병변으로 일차감각운동영역과 측두-두정-후두엽이 만나는 부위 사이의 단절시(Fig. 1의 2부위) 관념운동실행증이, 일차감각운동영역(Fig. 1의 1부위) 병변시 사지운동실행증이 나타난다고 제시하였다.

현재까지도 Liepmann의 전반적인 분류개념은 받아들여지고 있다. 그러나, 사지운동실행증의 경우는 동전돌리기, Pegboard 등 손가락의 정밀한 운동(dexterity, dexterity)

교신저자: 정 용, 대전시 유성구 과학로 335  
 ☎ 305-701, KAIST 바이오및뇌공학과  
 Tel: 042-350-4324, Fax: 042-350-4380  
 E-mail: yong@kaist.ac.kr

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 연구지원프로그램으로 지원받았음(연구과제 관리코드: R32-2008-000-10218-0).



**Fig. 1.** Liepmann's last version of the stream of action control. The movement formula is created in posterior brain regions (in the image corresponding to the temporo-parieto-occipital junction) with a predominance of the left hemisphere. It is transferred forwardly to the sensorimotor (central) region. The three circles denote the localization of three variants of apraxia. A posterior lesion prevents creation of the movement formula and causes "ideational apraxia". A parietal lesion interrupts the connection between movement formula and motor execution and leads to "ideo-kinetic" apraxia. A lesion in the sensorimotor region itself may either cause a combination of right-sided hemiparesis and left sided apraxia or, if incomplete, destroy motor engrams of highly overlearned routine actions which Liepmann believed to be stored locally in sensorimotor cortex. This would result in "limb-kinetic" apraxia of only the right hand (from 12).

의 장애로서 고위 인지기능의 장애가 아니기 때문에 엄격한 의미의 실행증이라 할 수 없다.

이외에도 실행증의 다른 분류에는 신체부위에 따라 사지실행증(limb apraxia), 구강안면실행증(buccofacial apraxia), 몸통실행증(truncal apraxia) 등으로 구분할 수 있다.

그리고 뇌량의 절단으로 인하여 왼쪽 반구의 운동프로그램에 대한 정보가 우반구로 전달 되지 못하여 왼쪽 손에 실행증을 보이는 뇌량실행증(callosal apraxia), 단절실행증(disassociation apraxia), 전도실행증(conduction apraxia), 개념실행증(conceptual apraxia) 등이 있다.

이외에도 구성 실행증(constructional apraxia), 옷입기실행증(dressing apraxia) 등의 용어가 널리 사용되나 이들은 주로 우반구 병변에 의해서 생기는 시공간기능 장애로 인한 행동장애로서 엄격한 의미에서 실행증이 아니다. 또한 보행실행증(gait apraxia)나 눈뜨기실행증(apraxia of eye opening)도 여기서 설명하고자 하는 실행증과는 거리가 있다. 따라서 일반적으로 실행증이라 함은 위에서 언급한 관념운동실행증, 관념실행증을 일컬으며 관념운동실행증

에는 사지실행증(limb apraxia)과 구강안면실행증(buccofacial apraxia)이 있다고 할 수 있다. 각각에 대해 간단히 소개하고 관념운동실행증에 중점을 두어 신경해부학적 기전을 설명하고자 한다.

## 2) 관념운동실행증(Ideomotor apraxia)

관념운동실행증이란 간단한 행동(예, 가위질하는 흉내)을 '요구' 할 때 적절한 동작을 취하지 못함을 말한다. 그러나 자연스러운 상황에서 자발적으로 할 때 그 실제 행동에 어려움이 없는 경우가 많다. 예를 들어 '가위질하는 흉내를 내 보십시오.'라는 구두 명령에 동작을 부적절하게 취하지만 실제 가위를 손에 쥐어주면 사용하는데 어려움이 없다. 그러나 관념운동실행증이 매우 심해지면 실제로 가위를 쥐어주었을 때도 잘 사용하지 못하게 된다. 실행증을 가진 환자에서 보이는 오류에는 동작이 시간적(순서, 시간 등)이나 공간적(크기 등)으로 잘못 수행하는 경우이다. 공간적 오류 중 신체도구화 오류(body part as an object [BPO] error)가 있다. 예를 들어, 가위질이나 양치질하는 흉내를 시켰을 때 손가락을 가위날로 사용하거나 칫솔 같은 도구로 사용하는 경우가 있다. 이런 오류는 때때로 정상인에게도 나타나므로 "실제로 가위가 손에 있다고 생각하고 흉내를 내보십시오."라고 다시 지침을 주어야 한다. 한 두 번 반복해도 동일한 오류를 계속하면 실행증으로 간주 한다. 혼한 또한 다른 항목을 실시하는 데도 그 전 동작을 계속하거나 그 동작이 새로운 동작에 섞일 수 있다. 이를 보속증 오류(perseveration error)라고 한다.<sup>13</sup>

## 3) 구강안면실행증(Buccofacial apraxia, orofacial apraxia)

구강안면실행증을 가진 환자들은 얼굴, 입술, 혀, 후두, 인두에 연관된 숙련된 운동을 못하게 된다. 눈감기, 입벌리기, 휘파람불기 등의 동작을 시켜보면 여러 가지 오류를 보일 수 있는데 제일 흔한 것이 소리나 말로 대신 하는 것과 보속증을 보이는 것이다. 예를 들어서 "휘파람 부는 흉내를 내보세요" 또는 "촛불 끄는 흉내를 내보세요"라는 명령에 환자는 입으로 바람을 내지 못하고 대신 '휘', '우' 같은 소리만 낸다. 또 눈을 감으라는 명령 다음에 혀를 내밀어보라는 명령을 주었을 때 계속해서 눈을 감는 동작을 반복한다. 관념운동실행증을 보이는 환자와 마찬가지로 구강안면실행증을 가진 환자도 실제 상황에서는 수행이 호전된다. 즉, 성냥불을 끄는 흉내를 내지 못하는 환자가 성냥불을 켜주면 불수 있게 되고 빨대로 빠는 흉내를 내지 못하다가 음료수에 빨대를 꼽아주면 가능해 지는 것이다.

사지에 대한 관념운동실행증과 구강안면실행증은 대개

병행해서 나타나지만 20~30%의 환자에게서 독립적으로 나타날 수 있다.<sup>14,16</sup> 구강안면실행증을 일으키는 대표적인 병소는 전두엽, 중심전이랑이 가측고랑(lateral sulcus)과 만나는 부분, 도(insula) 등이다.<sup>17</sup> 흔히 말실행증(apraxia of speech)에서 동반되어 나타난다.<sup>18,19</sup>

#### 4) 관념실행증(Ideational apraxia)

관념실행증은 도구나 대상을 이용하는 일련의 연속동작을 하는데 있어 장애를 보이는 것을 말한다. 예를 들어 편지 부치기나 담배피기 등의 과제를 수행하지 못한다. 신경해부학적으로는 관념실행증의 중요 요소인 연속된 행동에 대한 병변연구<sup>20</sup>나 기능영상연구<sup>21</sup>에서 전두엽이 중요한 것으로 보이나 관념실행증은 국소적인 병변보다는 전반적인 인지장애가 있을 때 나타난다. 따라서 국소화에 대한 가치는 떨어지며 주로 치매 환자에게 주로 나타난다. 관념실행증은 실생활에서 요구되는 연속된 행동에 장애를 보이므로 일상생활에 장애를 가져오나 앞서 언급한 관념운동실행증은 매우 심하기 전에는 실제 도구 사용에 별지장을 주지 않는다. 치매 환자들의 요리 솜씨가 떨어지는 경우 기억력 장애에 의한 경우보다는 관념실행증에 의한 경우가 더 흔할 것으로 생각된다.<sup>22</sup>

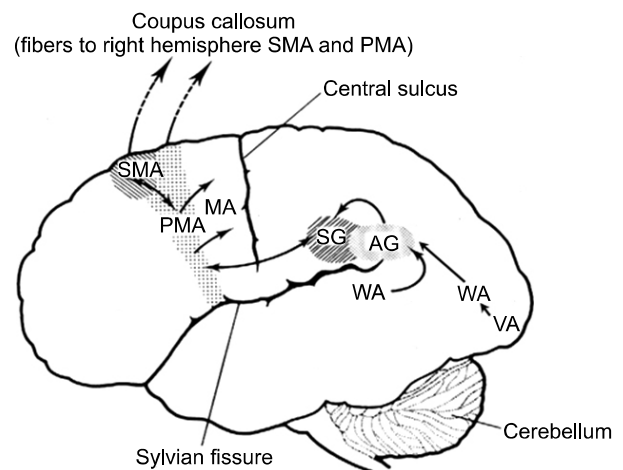
#### 5) 실행증의 병인 및 신경해부학

기존의 연구 결과들은 실행증을 일으키는 공통된 단일 부위가 있지 않음을 보여주고 있으며 이러한 사실은 능숙한 사지 운동(praxis)에 여러 부위가 관여하고 있음을 의미한다. 또한 뇌병변 환자를 대상으로 한 연구나 기능성 뇌영상을 이용한 연구가 차이를 보일 수 있다. 기본적으로 실행증은 대부분 좌반구(우성반구) 병변에 의해 나타난다. 특히 하두정소엽, 전두엽(주로 전운동, 보조운동영역), 뇌량과 피질하 구조인 기저핵 특히 조가비핵(putamen) 및 시상, 주변 백질 부위의 병변<sup>23,24</sup>으로도 실행증이 나타난다.

실행증은 좌반구 병변에 의해 많이 나타나기 때문에 흔히 실어증과 동반된다. 이러한 점 때문에 초기에는 실행증의 기전을 설명하는 가설로서 두 증상을 같이 설명할 수 있는 상징화(symbolization) 장애로 설명하고자 하였다.<sup>25</sup> 즉 실어증은 언어적 상징화의 장애로 실행증은 비언어적 상징화의 장애로 같은 기전을 공유한다고 설명하였다. 그러나 실어증과 실행증이 서로 해리(dissociation)되어 있다는 일련의 연구결과로 이 가설은 받아들여지지 않고 있다. 이후에 제시된 가설로는 Geschwind에 의해 제안된 단절가설(disconnection theory)이 있다.<sup>26</sup> Geschwind는 베르니케(Wernicke)가 제시한 언어 처리과정과 유사하게 구두로 전달된 명령이 베르니케 영역으로 들어와 공상 섬유

(arcuate fasciculus)를 통해 동측 측, 좌측의 운동영역으로 전달되고 뇌량섬유를 통해 우측의 운동영역으로 전달되어 praxis가 시행된다고 보았다. 두정엽 손상시 공상섬유의 침범으로 베르니케영역과 운동영역 사이의 단절로 인해 실행증이 발생한다고 보았다.

Heilman과 Roth<sup>1,27</sup>는 Geschwind의 가설을 반박하여 좌반구 하두정소엽에 소위 praxicon이라는 동작 모음(memory store of movement) 또는 visuokinesthetic engram이 따로 존재하여 보조운동영역에서 실제 근수축을 위한 정보로 변환된다고 보았다. Praxicon 속에 동작들이 체계적으로 정리되어 이들이 조합되어 여러 복잡한 운동이 가능하리라 여겨진다. Fig. 2는 이 가설의 관념운동실행증이 생기는 상황을 도식적으로 설명해 주고 있다. 먼저 “가위질하는 흉내를 내 보세요.”라는 구두 명령(언어 자극) 또는 동작을 보여 주거나 실물을 보여주었을 때(시각 자극) 각각 왼쪽 베르니케 부위, 시각 중추를 통해 먼저 하두정소엽에 존재하는 praxicon으로 정보가 들어간다. 그 다음 praxicon의 정보가 해석되어 좌측 보조운동영역(supplementary motor area)과 기저핵으로 전달되면 여기에서 어떤 근육을 언제, 어떻게 움직일 것인가를 결정하는 운동프로그램이 만들어지고 이것이 최종적으로 피질척수를 통해 동작으로 산출되는 것이라고 생각된다. 왼손의



**Fig. 2.** Heilman's postulated that parietal lesions destroy the movement formula itself rather than disconnecting it from motor execution. PMA = premotor; MA = motor area; SG = supramarginal gyrus; AG = angular gyrus; W = Wernicke's area; VVA = visual association area; VA = primary visual area. Movement formulas are stored in angular and supramarginal gyrus and are from there transferred via premotor cortex to the motor region. When gestures are performed on verbal command the movement formula is activated from Wernicke's area, and when they are imitated, from visual areas.

음직임은 좌반구 보조운동영역의 정보가 우반구 보조운동영역으로 뇌량을 통해서 전달해 줌으로써 가능해진다고 생각된다.

실행증은 상기 언급한 회로에 이상이 있으면 발생한다. 대표적으로 앞에서 언급한 세가지 병변을 생각해 볼 수 있다. 첫째로 praxicon이 존재하는 좌반구 두정엽 병변, 둘째로 좌반구 전두엽 병변, 셋째로 뇌량 병변이다. 뇌량 병변에 의한 실행증은 왼쪽 손에만 국한 된다. 이러한 경우를 뇌량실행증(callosal apraxia)이라 한다. 이때 구두로 전달된 언어 정보가 우반구로 전달되지 못해 나타났다고 생각할 수 있으나 시각자극 제시에 의한 지시에도 오류를 보인다. 따라서 단순히 언어 정보 전달의 차단에 의한 것이 아님을 알 수 있다.

학자들은<sup>27,28</sup> praxicon 자체가 손상된 두정엽 병변과 praxicon이 손상되지 않은 전두엽 병변을 비교해 보았다. 둘 다 구두 명령, 모방 등에 대한 실행증이 있지만 나타나는 현상이 조금 다르다고 한다. 두정엽 병변 환자는 동작 인식(gesture recognition) 기능이 떨어지나 (예를 들어, 가위를 사용하는 동작, 열쇠로 문을 여는 동작, 드라이버를 사용하는 동작 등을 보여주고 이 중에서 열쇠에 대한 동작이 어느 것인지를 물어 봄) 전두엽 병변을 가진 환자는 동작인식이나 동작이해(gesture comprehension)를 잘 한다고 한다. 동작인식에 관여하는 부위 중 좌측 하전두부위가 있다.<sup>29</sup> 이 부위는 두정엽과 더불어 목적성이 있는 팔 운동을 관찰할 때 활성화 되는 거울신경세포(mirror neuron system)가 존재하는 부위로서<sup>30</sup> 최근 들어 실행증 특히 동작인식이나 동작모방 등에서 거울신경세포계가 관여할 것으로 생각되고 있다.<sup>31,32</sup>

실행증에 관여하는 신경해부학적 부위를 좀더 근본적인 기전을 중심으로 설명하고자 한다. 환자들에게서 나타나는 실행증의 오류, 특히 관념운동실행증의 오류는 대부분 시간적, 공간적 오류이다. 따라서 대부분의 실행증 환자에게서 무슨 동작을 하려고 하는 지 의도는 어느 정도 알 수 있다. 즉 환자들이 '무엇'에 대한 개념은 있으나 '어떻게'에 대한 개념이 소실된다고 볼 수 있다. 여기에서 Goodale과 Milner<sup>33</sup>가 주장한 how pathway (또는 where pathway, dorsal pathway)와의 연관성을 유추해 볼 수 있다. 즉, 실행증의 요소에는 다가가기/잡기(reaching/grasping; prehension)를 관장하는 두정전두엽회로(parieto-frontal systems)의 장애가 있다고 볼 수 있다. 다른 한편으로는 운동순서가 연속적으로 이루어져야 하므로 이에 관여하는 전두선조회로(fronto-striatal system)의 장애도 실행증의 요소로 볼 수 있다. 각각에 대해 좀더 살펴보고자 한다.

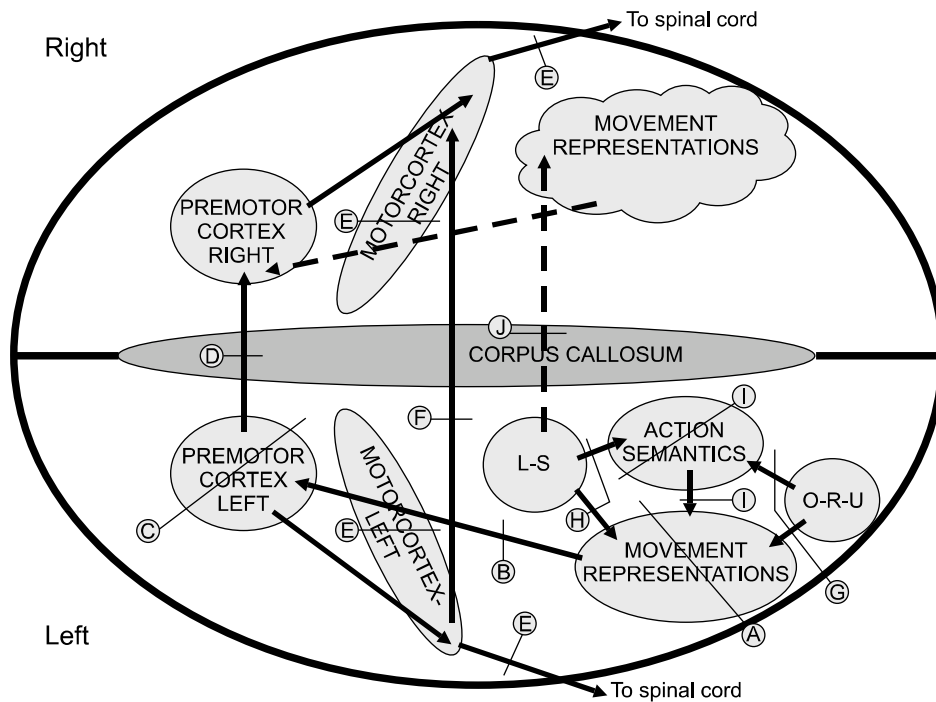
다가가기/잡기(reaching/grasping; prehension)를 관장하

는 두정전두엽회로에도 다양한 회로가 존재한다. 대부분의 연구가 원숭이를 이용한 연구이기 때문에 해석 시 주의가 필요하지만 사람을 대상으로 한 영상연구에서도 비슷한 결과들이 보고되고 있다. 이에는 다가가기(reaching)를 위한 시각과 체감각 정보를 통합하여 전두엽에 전하는 회로, 자세에 대한 회로 등이 주로 상두정소엽과 전두엽 사이에 존재하며, 하두정소엽에서 시작하는 회로에는 잡기(grasping)를 위한 회로, 주위 공간정보처리를 위한 회로 등이 있다.<sup>34</sup> 이러한 회로 구성 부위는 실행증을 유발하는 병변 부위와 일치된다. 또한 다가가기와 잡기 등의 과제 수행시 PET,<sup>35,36</sup> fMRI<sup>37,38</sup> 등의 기능적 영상연구의 결과들도 같은 부위의 활성을 가져옴을 보고하고. 따라서 실행증을 일으키는 병변들이 이러한 회로들을 구성하는 부위의 손상과 관계되어 있을 것으로 보이며 다양한 오류 양상이 이들 회로 중 어떤 회로의 손상이냐에 따라 나타나는 것으로 생각된다.

Praxis의 두번째 요소로서 연속적인 운동이 있다. 기능적 영상연구들의 결과를 통해 연속운동에 관여하는 회로에는 크게 두가지가 있다. 먼저 자동적이며 능숙한 연속 동작 시에는 보조운동영역, 일차 체감각운동피질, 기저핵(주로 피각 뒤쪽)과 소뇌로 이루어진 회로가 관여하며, 새로운 복잡한 연속 운동 수행 시에는 여러 감각의 통합과 함께 집중력, 작업기억 등이 요구되어 전전두엽, 전운동영역, 선조체의 앞쪽 부분이 형성하는 회로가 있다.<sup>39,41</sup> 실행증은 이중에서 익숙한 운동을 수행하는 회로가 관여할 것으로 생각되지만 실제로 임상에서 실행증 검사 시에는 도구 없이 수행하기 때문에 자동적 운동 회로보다는 새로운 운동에 관여하는 회로가 더 관여하는 것으로 보인다. 이 회로는 운동의 시간맞추기, 주의집중, 사지운동의 선택과 정 등으로 구분되기 때문에 손상부위에 따라 다양한 양상의 순서 오류를 보일 수 있다.<sup>42,43</sup>

이외에 실행증과 관련된 요소로서 도구 자체에 대한 의미 정보(action semantic system)가 있다. 이 기능의 손상 시 도구의 이름대기가 안되는 개념실행증(conceptual apraxia)이 나타난다. 신경해부학적 부위는 환자대상 연구에서는 좌반구의 두정, 측두, 후두엽 이 만나는 부위이고<sup>44</sup> 기능영상연구에서는 좌측 중간측두이랑(middle temporal gyrus, MTG)의 뒤쪽 부위가 이러한 기능을 맡고 있다고 보고하였다.<sup>45</sup>

이러한 기본적인 역할을 가지고 있는 다양한 신경회로의 작동으로 우리는 능숙한 행동을 처리할 수 있으며 회로의 손상에 따라 다양한 양상의 실행증이 나타나는 것으로 생각된다.



**Fig. 3.** Cartoon of the praxis system and the injuries that can induce the different forms of apraxia. O-R-U, object recognition units. These visual representations are stored in the ventral occipital-temporal cortex. L-S, the lexical-semantic network. The other modular networks are labeled. The arrows represent the pathways that connect these modular networks. The lines with letters attached represent either damage to a network or disconnection between the networks. Damage to the different networks and their connections induce different forms of apraxia, including: A, ideomotor apraxia with impaired pantomime to command, imitation, tool-implement use and impaired discrimination; B, intrahemispheric disconnection ideomotor apraxia, with intact discrimination; C, premotor ideomotor apraxia with same symptoms as B; D, callosal (disconnection) interhemispheric ideomotor apraxia and/or callosal interhemispheric conceptual apraxia; E, intrahemispheric limb-kinetic apraxia; F, intrahemispheric disconnection limb kinetic apraxia; G, visual intrahemispheric dissociation apraxia; H, verbal intrahemispheric dissociation apraxia; I, conceptual apraxia. Some patients have movement representations in both hemispheres (right hemisphere movement representations are illustrated in this cartoon as a cloud). In these patients a callosal disconnection; J, verbal dissociation apraxia of the left, but not right hand (from ref. 46 with permission).

## 결 론

실행증은 단일 인지기능장애라기 보다는 고위 인지과정 중의 운동기능 장애에 대한 총체적 결과로 나오는 증상이라 할 수 있다. 실행증을 일으키는 뇌병변 부위는 크게 우성반구의 두정엽, 전두엽 일부 그리고 뇌량을 들 수 있고 이외에도 기저핵 등도 관여하고 있다. 이중 좌반구 두정엽에는 praxicon이 존재하며 이 정보가 전두엽 그리고 뇌량을 통해 반대쪽 반구로 전달된다고 생각되고 있다. 즉, 이러한 여러 뇌부위들은 서로 연결되어 회로를 형성하는데 이는 능숙한 운동을 위한 독자적인 회로라기 보다는 기본적인 요소들을 처리하는 여러 회로들이 복합적으로 관여한다고 이해하는 것이 옳을 것이다. 각각의 회로 손상 시 나타날 수 있는 실행증의 유형을 Fig. 3에 표시하였다.<sup>46</sup> 잡기와 다가가기에 관여하는 두정전두회로, 연속적

인 운동을 처리하는 전두선조회로, 이외에도 도구에 대한 의미처리 회로 등 다양한 회로가 능숙한 운동 정보의 처리에 관여한다고 할 수 있으며 어떤 회로가 어느 정도의 손상을 받았는 지에 따라 다양한 양상의 실행증이 나타난다고 할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- 1) Heilman KM. Apraxia. In: Heilman KM, Valenstein E, eds. *Clinical Neuropsychology*. 4th ed. New York: Oxford University Press; 2003:215-235
- 2) Hanna-Pladdy B, Heilman KM, Foundas AL. Ecological implications of ideomotor apraxia: evidence from physical activities of daily living. *Neurology*. 2003;60:487-490
- 3) Zadikoff C, Lang AE. Apraxia in movement disorders. *Brain*. 2005;128:1480-1497
- 4) Johnson-Frey SH. The neural bases of complex tool use in humans. *Trends Cogn Sci*. 2004;8:71-78

- 5) Leiguarda RC, Marsden CD. Limb apraxias: higher-order disorders of sensorimotor integration. *Brain*. 2000;123:860-79
- 6) Wheaton LA, Hallett M. Ideomotor apraxia: a review. *J Neurol Sci*. 2007;260:1-10
- 7) Gross RG, Grossman M. Update on apraxia. *Curr Neurol Neurosci Rep*. 2008;8:490-496
- 8) Goldenberg G. Apraxia and the parietal lobes. *Neuropsychologia*. In Press
- 9) Liepmann H. The syndrome of apraxia (motor asymboly) based on a case of unilateral apraxia. *Monatsschrift für Psychiatrie und Neurologie*. 1900;8:15-44
- 10) Liepmann H. The left hemisphere and action. *Münch Med Wschr*. 1905:48-49
- 11) Liepmann H. *Drei Aufsätze aus dem Apraxiegebiet*. Berlin: Karger; 1908
- 12) Liepmann H. Apraxie. *Ergebn ges Med*. 1920;1:516-543
- 13) Rothi LJ, Raymer AM, Heilman KM. Limb praxis assessment In: Rothi LJ, Heilman KM eds, *Apraxia: the Neuropsychology of Action*. Hove (UK): Psychology Press; 1997:61-73
- 14) Raade AS, Rothi LJG, Heilman KM. The relationship between buccofacial and limb apraxia. *Brain Cogn*. 1991;16: 130-146
- 15) Basso A, Luzzatti C, Spinnler H. Is ideomotor apraxia the outcome of damage to well-defined regions of the left hemisphere? Neuropsychological study of CAT correlation. *J Neurol Neurosurg Psychiatr*. 1980;43:118-126
- 16) De Renzi E, Pieczuro A, Vignolo L. Ideational apraxia: a quantitative study. *Neuropsychologia*. 1968;6:41-52
- 17) Tognola G, Vignolo LA. Brain lesions associated with oral apraxia in stroke patients: a cliniconoradiological investigation with the CT scan. *Neurophysiologica*. 1980;18: 257-272
- 18) La Pointe LL, Wertz RT. Oral-movement abilities and articulatory characteristics of brain-injured adults. *Percept Mot Skills*. 1974;39:39-46.
- 19) Dronkers NF. A new brain region for coordinating speech coordination. *Nature*. 1996;384:159-161
- 20) De Renzi E, Lucchelli F. Ideational apraxia. *Brain*. 1988;111: 1173-1185
- 21) Ebisch SJ, Babiloni C, Del Gratta C, Ferretti A, Perrucci MG, Caulo M, Sitskoorn MM, Romani GL. Human neural systems for conceptual knowledge of proper object use: a functional magnetic resonance imaging study. *Cereb Cortex*. 2007;17: 2744-2751
- 22) Rapcsak SZ, Crosswell SC, Rubens AB. Apraxia in Alzheimer's disease. *Neurology*. 1989;39:664-668
- 23) Leiguarda R. Limb apraxia: cortical or subcortical. *Neuroimage*. 2001;14:S137-141
- 24) Hanna-Pladdy B, Heilman KM, Foundas AL. Cortical and subcortical contributions to ideomotor apraxia: analysis of task demands and error types. *Brain*. 2001;124:2513-2527
- 25) Goldstein K. *Language and Language disturbances*. New York: Grune and Stratton Inc.; 1948
- 26) Geschwind N. Disconnection syndromes in animals and man. *Brain*. 1965;88:237-294
- 27) Heilman KM, Rothi LJ, Valenstein E. Two forms of ideomotor apraxia. *Neurology*. 1982;32:342-346
- 28) Rothi LJG, Heilman KM. Ideomotor apraxia: gestural learning and memory. In: Roy EA, ed. *Neuropsychological Studies in Apraxia and Related Disorder*. New York: Oxford University Press; 1985:65-74
- 29) Grabowski TJ, Damasio H, Damasio AR. Premotor and prefrontal correlates of category-related lexical retrieval. *Neuroimage*. 1998;7:232-243
- 30) Rizzolatti G, Craighero L. The mirror-neuron system. *Ann Rev Neurosci*. 2004;27:169-192
- 31) McGeoch PD, Brang D, Ramachandran VS. Apraxia, metaphor and mirror neurons. *Med Hypotheses*. 2007;69: 1165-1168
- 32) Pazzaglia M, Smania N, Corato E, Aglioti SM. Neural underpinnings of gesture discrimination in patients with limb apraxia. *J Neurosci*. 2008;28:3030-3041
- 33) Goodale MA, Milner AD. Separate visual pathways for perception and action. *Trends Neurosci*. 1992;15:20-25
- 34) Rizzolatti G, Luppino G, Matelli M. The organization of the cortical motor system: new concepts. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1998;106:283-296
- 35) Matsumura M, Kawashima R, Naito E, Satoh K, Takaha, Fukuda H. Changes in rCBF during grasping in humans examined by PET. *Neuroreport*. 1996;7:749-752
- 36) Faillenot I, Toni I, Decety J, Grégoire MC, Jeannerod M. Visual pathways for object-oriented action and object recognition: functional anatomy with PET. *Cereb Cortex*. 1997;7:77-85
- 37) Binkofski F, Dohle C, Posse S, Stephan KM, Hefter H, Seitz RJ, Freud HJ. Human anterior intraparietal area subserves prehension: a combined lesion and functional MRI activation study. *Neurology*. 1998;50:1253-1259
- 38) Stark A, Zohary E. Parietal mapping of visuomotor transformations during human tool grasping. *Cereb Cortex*. 2008;18:2358-2368
- 39) Jenkins IH, Brooks DJ, Nixon PD, Frackowiak RS, Passingham RE. Motor sequence learning: a study with positron emission tomography. *J Neurosci*. 1994;14:3775-3790
- 40) Grafton ST, Hazeltine E, Ivry R. Functional mapping of sequence learning in normal humans. *J Cogn Neurosci*. 1995;7:497-510
- 41) Catalan MJ, Honda M, Weeks RA, Cohen LG, Hallett M. The functional neuroanatomy of simple and complex sequential finger movements: a PET study. *Brain*. 1998;121: 253-264
- 42) Harrington DL, Haaland KY. Motor sequencing with left hemisphere damage. Are some cognitive deficits specific to limb apraxia? *Brain*. 1992;115:857-874
- 43) Rushworth MF, Nixon PD, Wade DT, Renowden S, Passingham RE. The left hemisphere and the selection of learned actions. *Neuropsychologia*. 1998;36:11-24
- 44) Tranel D, Damasio H, Damasio AR. A neural basis for the retrieval of conceptual knowledge. *Neuropsychologia*. 1997;

35:1319-1327

45) Martin A, Wiggs CL, Ungerleider LG, Haxby JV. Neural correlates of category-specific knowledge. *Nature*. 1996;379:

649-652

46) Heilman KM, Watson RT. Disconnection apraxias. *Cortex*. 2008;44:975-982