

Review Article

척추 수술의 수술중신경계감시를 위한 기본 해부학: 운동신경로와 감각신경로

송민근*

전남대학교병원 재활의학과

Basic anatomy for intraoperative neurophysiological monitoring in spine surgery: motor and sensory tract

Min-Keun Song*

Department of Physical & Rehabilitation Medicine, Chonnam National University Hospital, Gwangju, Korea

ABSTRACT

Nowadays, intraoperative neurophysiological monitoring (INM) in spine surgery is essential and important method to prevent the complication of neuronal injury and preservation of function after various spine surgeries. In this article, we review the basic anatomy for INM to monitor the sensorimotor pathways during spine surgery. Also, we describe the anatomical factors affecting INM. This review article is helpful for the inspectors performing INM to contribute to the maintenance of postoperative function and prevention of complications.

Keywords: anatomy; intraoperative neurophysiological monitoring

서론

수술 중 신경 손상을 막고 기능을 유지하기 위해 신경생리학적 검사를 시행하는 수술중신경계감시(intraoperative neurophysiological monitoring, INM)에서 감시를 진행하는 부위의 신경해부학적 구조와 신경생리, 수술 부위에 대한 전반적인 해부학적 지식을 숙지하는 것이 중요하다.

수술중신경계감시는 척추 측만증, 척추동정맥 기형과 종양, 불안정한 골절, 척수 공동의 절제술, 척추 압박, 척추 혈관 색전증, 계류척수증후군(tethered cord syndrome), 경직을 조절하기 위한 척수신경후근절단술(posterior rhizotomy) 등 다양한 척추 외과 시술에 도움될 수 있다[1-3]. 특히 환자가 기존의 신경학적 손상을 가지고 있거나, 척수가 손상되었거나, 절골술 등을 시행 시 신경상태의 감시가 필요한 경우는 수술과 함께 수술중신경계감시가 수행되는 것이 일반적이다. 감각신경로를 평가하기 위해 체성감각유발전위를 이용하고, 운동신경로를 평가하기 위해 경두개 전기자극을 통한 상하지의 표면 또는 근육 내 근전도 신호를 측정하는 운동유발전위

와 함께 직접 척수 자극을 사용하여 감시를 시행한다[4]. 이번 종설은 척추 수술 중 진행되는 수술중신경계감시에서 주로 감시를 시행하는 신경주행로 및 전달 경로에 비중을 두고 종설을 작성하였다.

본론

1. 척추 해부학

1) 척주(the spinal column)

33개의 뼈로 구성된 척주는 유연하지만, 척수를 보호하는 기능도 담당한다. 척주는 7개의 경추, 12개의 흉추, 5개의 요추, 5개의 천추, 4개의 미추로 구성되어 있다(Fig. 1). 각각은 추간판으로 분리되어 움직이는 개별 척추로 구성되어 있으나, 천추 및 미추 부분은 융합 척추로 움직이지 않는다. 왼쪽 및 오른쪽 척추뿌리(pedicle)와 척추판(lamina)에 의해 형성된 척추 고리(vertebral arch)는 척추관을 둘러싸고 있으며, 척추관 내부에는 척수가 위치해 있고, 각 위치 별 척수신경이 나온다.

Received January 7, 2020; Revised January 19, 2020; Accepted January 25, 2020

*Corresponding author: Min-Keun Song, Department of Physical & Rehabilitation Medicine, Chonnam National University Hospital, #42, Jebong-Ro, Dong-Gu, Gwangju 61469, Korea

Tel: +82-62-220-5198, Fax: +82-62-228-5975, E-mail: drsongmk@daum.net

© 2020 Korean Society of Intraoperative Neurophysiological monitoring (KSION)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

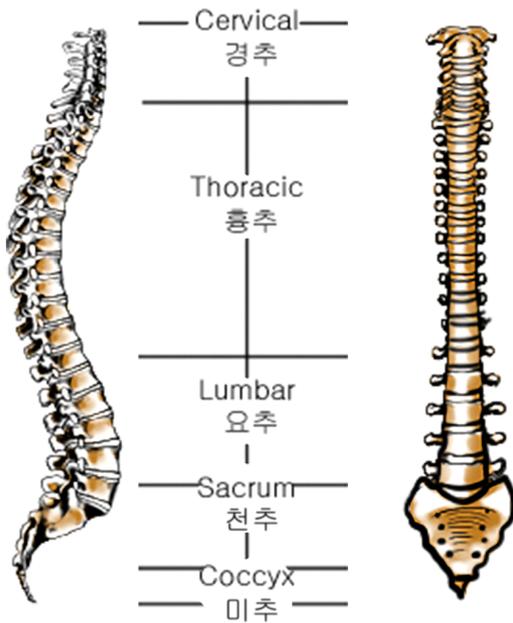


Fig. 1. The view of the vertebral column and its divisions.

2) 척수(the spinal cord)

척수는 숨뇌 끝부터 대략 요추 1번까지 위치하는 중추 신경으로, 감각 및 운동 정보를 뇌 및 말초로 전달한다. 척수는 총 31개의 분절로 나뉜다. 7개의 경추가 있으나 8개의 분절로 나뉘고, 12개의 흉추, 5개의 요추, 5개의 천추 및 1개의 미추 분절로 구성되어 있다. 각 척수 분절에서 한 쌍의 척수 신경이 기시하며, 총 31쌍의 척수 신경이 나온다.

척수는 요추 제 1번 위치의 척수원뿔(conus medullaris; Fig. 2)로 알려진 부분에서 끝난다. 척수원뿔은 하부 요추 및 천골 척수 분절을 포함하고, 따라서 요추 1번 근처의 수술은 천골 기능에 영향을 줄 수 있다. 척수원뿔의 부상은 배변 및 방광 조절의 결함을 포함하여 요추 신경총의 신경 마비를 초래하고, 성기능도 손상될 수 있기 때문에, 요추 제12번과 요추 제 1번 척추수술 시 외부 항문 괄약근에 대하여 수술중신경계 감시가 필요하다.

3) 척수의 내부구조

뇌실과 연속되는 척수관에는 척수가 포함되어 있다. 척추단면은 중앙에 나비 모양의 회백질과 그를 둘러싼 주변의 백질로 구성되어 있으며, 회백질은 Rexed 판(Fig. 3)으로 알려져 있는 10개의 기능적 층으로 구성되어 있다. Fig. 4에서 척수 단면을 개략적으로 살펴보면 감각전달신경로인 상행로는 위치 고유감각을 담당하는 신경다발인 박속다발(fasculus gracilis), 설상속다발(fasculus cutaneous)을 포함하는 뒤기둥내측응대로(posterior column medial lemniscal pathway)와 척

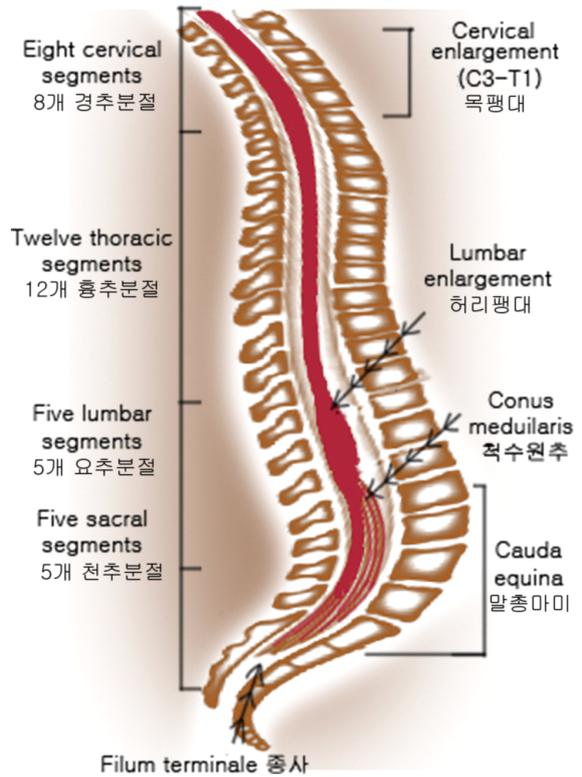


Fig. 2. The spinal cord and its segments.

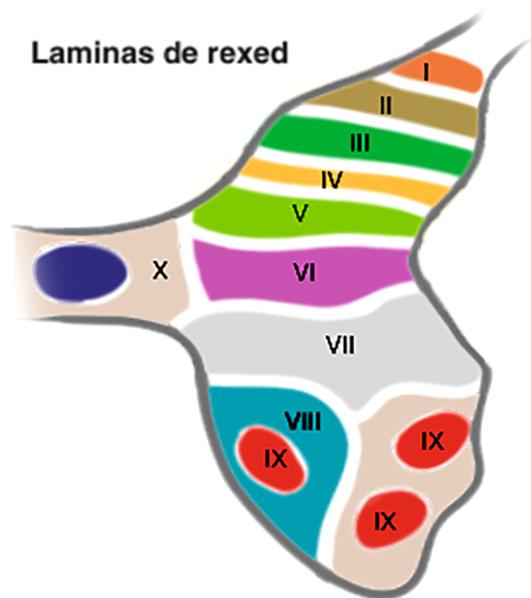


Fig. 3. Spinal cord gray matter into Rexed's laminae.

수소뇌로(spinocerebellar tract), 통증과 온도 감각을 전달하는 외척수시상로(lateral spinothalamic tract), 압력과 촉각을 전달하는 전척수시상로(anterior spinothalamic tract)와 척수올리브로(spinoolivary tract) 등으로 구성되어 있다.

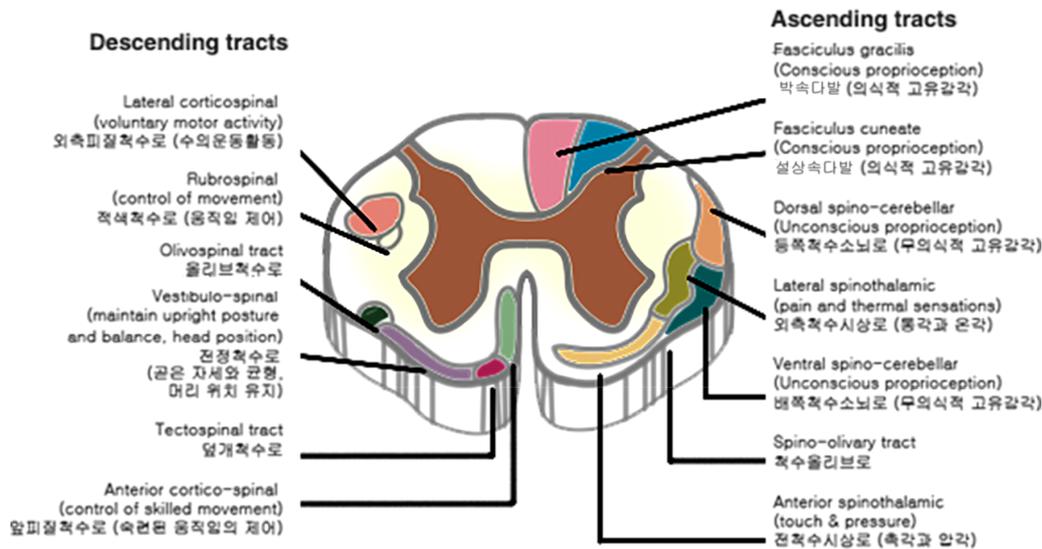


Fig. 4. A cross section through the spinal cord showing the white matter organization; Descending tracts (motor) on the left, ascending tracts (sensory) on the right.

하행로는 뇌의 주요 핵에서 시작하여 척수로 전달하고, 각 분절의 척수신경으로 전달되는 경로이고, 크게 피라미트와 바깥 피라미트로 두 가지 경로로 나뉜다. 피라미트에는 피질척수로 (corticospinal tract), 피질숨뇌로(corticobulbar tract)가 위치해 있으며, 바깥피라미트는 피라미트를 제외한 나머지 하행로인 안뜰척수로(vestibulospinal tract), 뒷개척수로(tectospinal tract) 등으로 구성되어 있다.

수술중신경계감시를 수행하는 검사자에게 특히 중요한 몇 가지 영역이 있다. 척수후기둥은 특정 감각 정보를 말초에서 뇌로 전달하고, 뒤기둥내측용대로 일부를 통해 체성감각유발 전위를 이용하여 신경계감시가 가능하다. 백질의 또 다른 중요한 영역은 자발적인 움직임을 담당하고, 운동 유발 전위를 사용하여 감시할 수 있는 피질척수로이다. Rexed 판 IX 및 X에는 피질 척수의 일부인 운동신경원이 들어 있으며, 이는 척수 회백질의 복부 뿔(ventral horn)이라고 불리는 영역에 포함되어 있다.

4) 척수신경(spinal nerve)

척수의 각 분절에서 한 쌍의 척수 신경이 나오며, 각 척수 신경은 등(감각) 뿌리와 배(운동)뿌리로 구성된 혼합 신경이다 (Fig. 5).

등뿌리(dorsal root)는 감각 정보를 말초에서 척수로 전달하고, 이를 구성하는 신경원은 자신의 세포체가 등뿌리신경절(dorsal root ganglion)로 알려진 구조에 위치한다. 척수 신경의 배뿌리는 척수에서 말초로 운동 정보를 전달하며, 복부 뿔에 위치한 신경원은 배뿌리근을 통해 축삭 돌기를 내보낸다. 등 및 배뿌리는 척수에서 빠져 나오기 전에 합쳐져서 척수 신

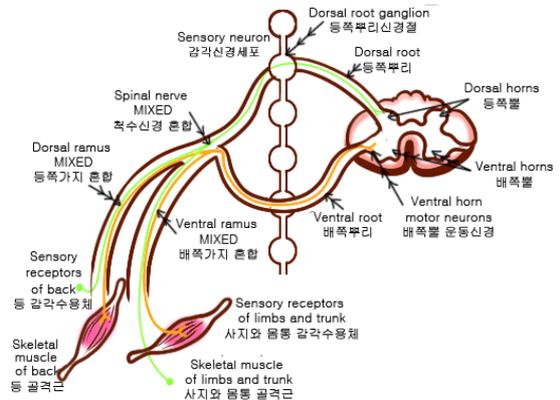


Fig. 5. Organization of spinal nerves.

경을 형성하고, 척추 내공을 통과한다.

5) 척수 혈관(spinal cord vasculature)

일반적으로 혈액학적인 영향을 받는 수술중신경계감시는 해부학적인 이해가 선행되어야 영향을 줄 수 있는 인자를 고려할 수 있다. 척추 주변의 동맥 분포를 살펴보면 후부 뇌 혈관에서 발생하는 세 개의 세로 동맥이 척수에 혈액을 공급하는데, 이 동맥 사이에는 문합을 통한 결순환이 있다. 이 문합은 vasocorona를 형성한다(Fig. 6). 또한 척수로 공급되는 혈액은 각 척수 분절에서 앞뒤 뿌리 동맥에 의해 공급되며, 신경 뿌리를 따라 척수로 들어간다.

척수의 뒤쪽척수동맥(posterior spinal artery)은 척수의 후기둥 및 바깥쪽 뒤뿔(posterior horn)의 혈액을 공급하고, 앞뿔(anterior horn)과 피질척수로(corticospinal tract)는

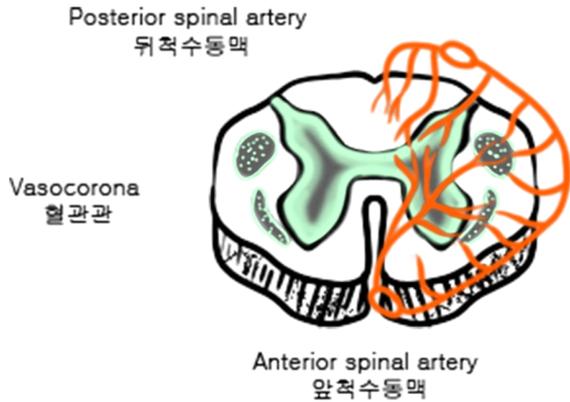


Fig. 6. Spinal cord arterial circulation.

앞척수동맥(anterior spinal artery)이 혈액공급을 담당한다. 가장 큰 전방 뿌리 동맥은 Adamkiewicz 동맥으로 알려져 있으며(Fig. 7), 이 동맥은 매우 가변적이며 대부분의 사람들은 낮은 흉추 또는 높은 요추 주변 좌측 대동맥에서 기시한다. 이 동맥은 척수의 앞쪽 3분의 2의 요추와 천골 부분의 혈액을 공급하기 때문에, 하부 흉추 부위의 수술 과정에서 손상의 위험이 높아 주의가 필요하다.

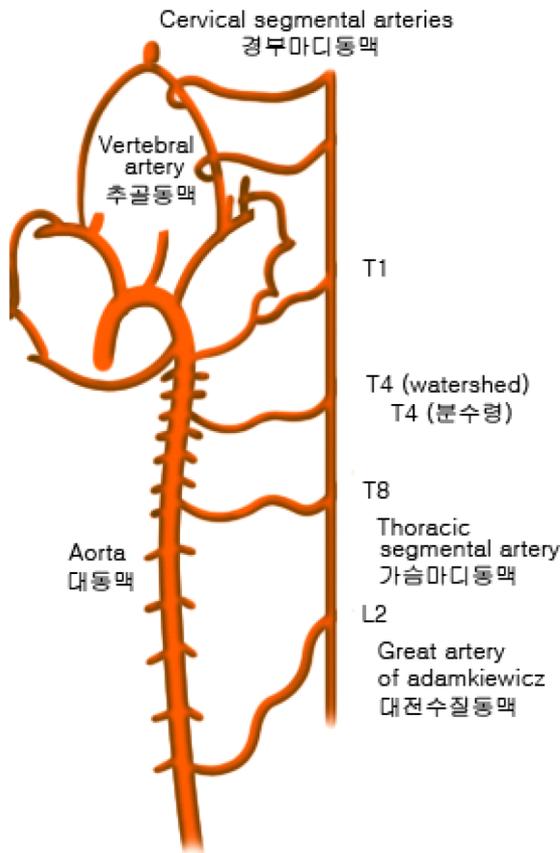


Fig. 7. Segmental arteries coming off of the aorta.

운동 유발 전위를 이용하면, 척수의 혈액공급에 대하여 감시할 수 있고, 특정 신경 혈관이 희생 또는 일시적으로 고정될 수 있는지 여부를 결정하는 데 도움이 된다.

2. 척추수술 시 필요한 감각신경로

체성감각은 일반적으로 뒤기둥경로(posterior dorsal column pathway)를 통해 전달되는 것으로 알려져 있다. 우선 근섬유의 구심성 섬유 중 큰 직경을 가진 Ia 및 II 섬유를 지나 척수의 후각에 도착한 후 뒤기둥(dorsal column) 과내측용대(medial lemniscus), 중심후회(postcentral gyrus), 시상(thalamus)을 경유하여 체성감각피질(somatosensory cortex) 부위에 도달한다.

체성감각은 뒤기둥(dorsal column)을 따라 주행하는 분별 촉각, 고유수용성 감각, 진동 감각 등과, 앞외측기둥(anterolateral column)으로 주행하는 통증, 온도감각 등이 있다. 말초신경으로 시작한 감각신경의 자극은 상하지의 신경얼기(plexus)를 지나 신경뿌리(root)를 통해 척수로 들어가고 뒤기둥을 거쳐서 연수(medulla oblongata)에 도달하게 되는데, 이 부분이 체성감각로에서의 일차신경세포이다. 일반적으로 뒤뿌리신경절(dorsal root ganglion)에 일차신경세포의 신경세포체가 위치한다.

일차신경세포는 연수에 존재하고, 팔에서부터 전달되는 경우 설상속핵(nucleus cuneatus)에서, 다리에서부터 전달되는 경우 박속핵(nucleus gracilis)에서 연결(synapse)한 뒤 주행을 이어간다. 이후에는 속활꼴섬유(internal arcuate fiber)로 교차(decussation)한 뒤에 반대쪽 내측용대(medial lemniscus)로 주행하고, 시상의 가쪽뒤배쪽핵(ventroposterolateral nucleus, VPL)에 다다른다. 이 곳에서 삼차신경세포와 연결을 하고, 속섬유막뒤쪽다리(posterior limb of internal capsule), 시상피질전달(thalamocortical projection)을 지나 일차감각피질(primary sensory cortex)까지 도달한다(Fig. 8).

드물게 수평주시마비와 진행성 척추측만증의 경우, 체성감각계의 뒤기둥 경로와 피질척수로 교차가 일어나지 않는 비교차(nondecussation)가 관찰되기도 한다. 즉, 뒤기둥 경로가 동측 피질로 주행하는 경우도 있으므로 수술중신경계감시를 시행하는 동안 이러한 해부학적 변이도 고려해야 한다[5,6].

일반적으로 이 체성감각 전달경로를 이용하여 수술중신경계감시를 시행하며, 상지의 정중신경을 이용한 유발전위에서는 일차감각피질전위(primary sensory cortex potential)로 생각되는 N19까지를 단잠시전위, 그 이후에 나타나는 전위들을 장잠시전위라 하고, 하지의 경골신경 유발전위의 경우 일차감각피질전위로 생각되는 P39까지를 단잠시전위, 그 이후를 장잠시전위라 한다. 각 파형의 유무 및 잠시의 지연, 파형 모습

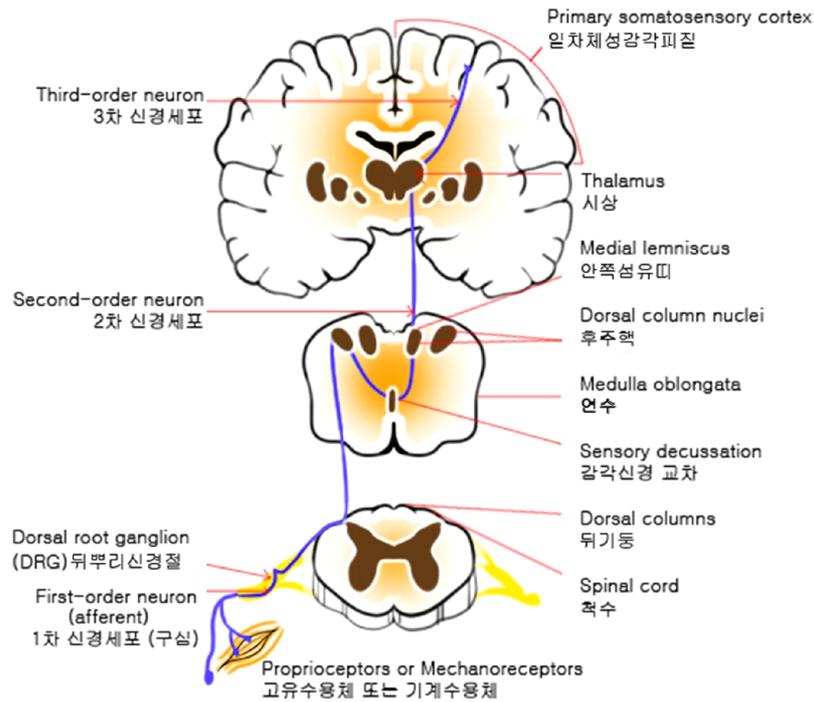


Fig. 8. The dorsal column medial lemniscal (DCML) pathway.

의 이상 등으로 이상 여부 및 이상 부위를 판별하게 되는데, 흔히 알려져 있는 유발전위의 근원으로는 정중신경을 자극하여 나타난 체성감각유발 전위의 경우 N9가 상완신경총, N13이 뒤기둥핵, N20이 피질로 알려져 있으며, 경골신경을 자극하여 나타나는 체성감각 유발 전위의 경우 이에 상응하는 것으로 N9가 다리오금, N22가 마미, N24가 뒤기둥핵, P37이 피질에 해당하는 것으로 알려져 있다[7].

3. 척추수술 시 필요한 운동신경로

피질척수로(corticospinal tract)는 운동피질에서 시작하여 척수를 지나 말초의 근육 운동을 유발시킨다. 이 경로에는 상부 운동 신경원과 하부 운동 신경원, 두 개의 신경원이 있다. 상부 운동 신경원은 중심앞이랑에 위치한 1차 운동 피질의 V 층에 있다. 알파 운동 신경원이라고도 하는 하부 운동 신경원은 척수 회백질의 복부 뿔(Horn)에 위치한다. 자발적 운동 조절은 중심앞이랑(pre-central gyrus)의 대뇌 피질 내 상부 운동 신경원의 수준에서 시작되며, 이후에 대뇌부챗살(corona radiata), 속섬유막, 대뇌다리(cerebral peduncle), 뇌바닥다리뇌(basis pontis), 연수피라미트를 지나 척수까지 이어진다.

원위부 근육을 담당하는 신경의 경우, 연수의 아래쪽 부분에서 반대로 교차하여 외측 피질척수로(lateral corticospinal tract)로 주행한다. 이와 달리 몸통 근육을 담당하는 신경은 교차하지 않고 배측 피질척수로(ventral corticospinal

tract)를 통해서 주행을 한다. 교차 섬유 및 소량의 교차되지 않은 섬유는 원위 근육을 자극하는 더 낮은 운동 신경원에서 측면 피질 척수로 및 시냅스로서 기여한다. 피라미트 궤적의 위치에서 교차되지 않은 채로 남아있는 대부분의 섬유는 전방 피질 척수로(anterior corticospinal tract)로 연결되고, 이 섬유는 일반적으로 시냅스 수준 근처에서 교차한다(Fig. 9).

운동신경로는 척수신경을 통해 운동단위에 자극을 전달하게 된다. 운동단위(motor unit)는 기본적인 기능적인 구조로서, 운동신경, 축삭, 축삭이 지배하는 모든 근육세포로 구성된다. 운동신경세포의 축삭들이 모여서 운동신경 및 척수의 앞뿌리(anterior root)로 주행하는데, 상지의 경우 팔신경얼기로, 하지는 말총에서 다리신경얼기로 주행한다.

근육은 일반적으로 하나의 주된 척수 신경의 지배를 받지만, 다른 척수 신경에 중복 지배를 받는 경우도 있다. 알파 운동 신경원에 대한 피질척수로 시냅스의 상부 운동 신경원으로부터의 하강 신호전달은, 입력이 충분하면, 그것들을 임계 값으로 가져와 활동 전위를 야기시킨다. 이러한 활동 전위는 복부 뿌리에서 실행되는 축삭을 따라 이동하고, 표적 골격근으로 가는 도중에 척추 신경 및 말초 신경에 합류한다[8-12].

이 운동신경로는 경두개자극을 통해 자극할 수 있으나, 수술 중 환자의 자극위치를 유지시키는데 어려움이 많고 주로 I파형이 생성되므로, 경두개 전기자극을 이용하여 D파형을 생성시키고, 이를 감시하는 방식으로 수술중신경감시를 시행하게 된다.

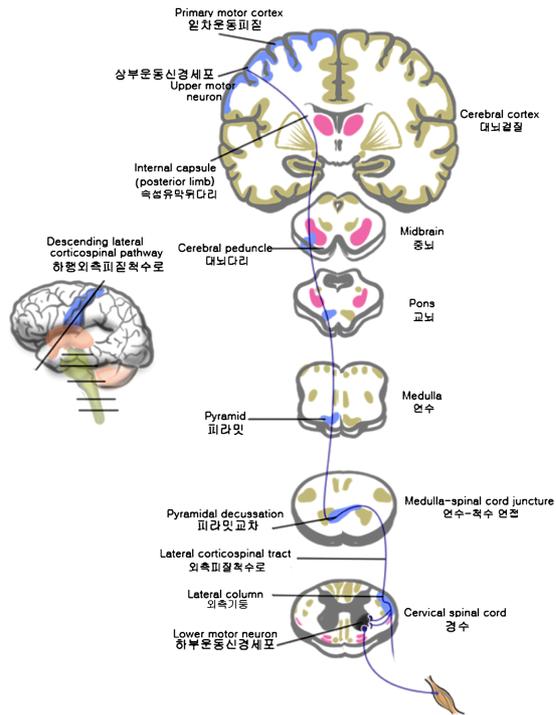


Fig. 9. The corticospinal tract.

결론

척추 수술 분야에서 수술중신경계감시를 시행할 때 기초 해부학 지식이 뒷받침되어야 정확하고 효율 높은 검사가 될 수 있을 것이다. 이를 바탕으로 질병에 따라 자극 부위와 기록 부위를 적절히 조합하고 응용하여 검사의 유용도를 높일 필요가 있다. 또한, 새로운 수술중신경계감시 기법의 개발 및 적용에 관한 다양한 연구를 시도하고, 수술중 신경계감시를 시행하는 검사자의 지속적인 교육과 관리가 이루어진다면, 국내 수술중신경계감시의 수준을 높이고, 수술 후 기능 유지 및 합병증 예방 등에 기여할 수 있을 것이다.

Ethical approval

This article does not require IRB/IACUC approval because there are no human and animal participants.

Conflicts of interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

ORCID

Min-Keun Song, <https://orcid.org/0000-0001-8186-5345>

References

1. Yamada T, Yeh M, Kimura J. Fundamental principles of somatosensory evoked potentials. *Phys Med Rehabil Clin N Am.* 2004;15:19-42.
2. Fisher RS, Raudzens P, Nunemacher M. Efficacy of intraoperative neurophysiological monitoring. *J Clin Neurophysiol.* 1995;12(1):97-109.
3. Nash CL. Current concepts review spinal cord monitoring. *J Bone Joint Surg.* 1989;71:627-30.
4. MacDonald DB, Streletz LJ, Al-Zayed Z, Abdool S, Stigsby B. Intraoperative neurophysiologic discovery of uncrossed sensory and motor pathways in a patient with horizontal gaze palsy and scoliosis. *Clin Neurophysiol.* 2004;115(3):576-82.
5. Vulliemoz S, Raineteau O, Jabaudon D. Reaching beyond the midline: why are human brains cross wired?. *Lancet Neurol.* 2005;4(2):87-99.
6. MacDonald DB, Al Zayed Z, Al Saddigi A. Four-limb muscle motor evoked potential and optimized somatosensory evoked potential monitoring with decussation assessment: results in 206 thoracolumbar spine surgeries. *Eur Spine J.* 2007;16(Suppl 2):S171-87.
7. Chiappa KH. *Evoked potentials in clinical medicine.* 3rd ed. Philadelphia, PA: Lippincott-Raven Publisher; 1997.
8. Agur AMR, Dalley AF. *Grant's atlas of anatomy.* 12th ed. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins; 2009.
9. Moore KL, Gest TR, Dalley AF, Agur AMR, Tank PW. *Clinically oriented anatomy.* 6th ed. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins; 2009.
10. Netter FH. *Atlas of human anatomy.* 5th ed. Philadelphia, PA: Elsevier; 2010.
11. Davis SF. *Anatomy of intraoperative monitoring.* In: Kaye AD, Davis SF, editors. *Principles of neurophysiological assessment, mapping, and monitoring.* New York, NY: Springer; 2014. p. 11-46.
12. Koo YS, Kim DY. Basic principles and practices of evoked potential for intraoperative neurophysiological monitoring: motor evoked potential and somatosensory evoked potential. *J Intraoper Neurophysiol.* 2019;1(1):14-24.