Korean Society for
Clinical Laboratory ScienceKorean Journal of
CLINICAL LABORATORY SCIENCE

REVIEW ARTICLE

Intraoperative Neurophysiological Monitoring and Neuromuscular Anesthesia Depth Monitoring

Sang-Hun Kim¹, Soon-Bu Park², Hyo-Chan Kang³, Sang-Ku Park⁴¹Department of Neurology, Kangbuk Samsung Hospital, Seoul, Korea²Physiologic Diagnostic Laboratory, Seoul National University Bundang Hospital, Seongnam, Korea³Department of Biomedical Laboratory Science, Daegu Hanny University, Daegu, Korea⁴Department of Neurosurgery, Konkuk University Medical Center, Seoul, Korea

수술 중 신경계 추적 감시 검사와 근 이완 마취 심도의 측정

김상훈¹, 박순부², 강효찬³, 박상구⁴¹강북삼성병원 신경과, ²분당서울대학교병원 특수검사부, ³대구한의대학교 임상병리학과, ⁴건국대학교병원 신경외과

ARTICLE INFO

Received November 3, 2020
Revised November 10, 2020
Accepted November 10, 2020

Key words

Anesthesia
Muscle relaxation
Neurophysiological monitoring

ABSTRACT

Deep blocking of consciousness alone does not prevent a reaction to severe stimuli, and copious amounts of pain medication do not guarantee unconsciousness. Therefore, anesthesia must satisfy both: the loss of consciousness as well as muscle relaxation. Muscle relaxants improve the intra-bronchial intubation, surgical field of vision, and operating conditions, while simultaneously reducing the dose of inhalation or intravenous anesthesia. Muscle relaxants are also very important for breathing management during controlled mechanical ventilation during surgery. Excessive dosage of such muscle relaxants may therefore affect neurological examinations during surgery, but an insufficient dosage will result in movement of the patient during the procedure. Hence, muscle relaxation anesthesia depth and neurophysiological monitoring during surgery are closely related. Using excessive muscle relaxants is disadvantageous, since neurophysiological examinations during surgery could be hindered, and eliminating the effects of complete muscle relaxation after surgery is challenging. In the operation of neurophysiological monitoring during the operation, the anesthesiologist administers muscle relaxant based on what standard, it is hoped that the examination will be performed more smoothly by examining the trends in the world as well as domestic and global trends in maintaining muscle relaxant.

Copyright © 2020 The Korean Society for Clinical Laboratory Science. All rights reserved.

서론

1942년 Griffith와 Johnson이 정제된 curare 추출물을 마취에 도입하여 가벼운 마취로 통증과 반사 근육 운동을 차단할 수 있다고 보고한 것이 근 이완제의 시초라 할 수 있다[1].

근 이완제의 사용은 외과수술에서 무균 처리법을 사용하게

된 것에 버금가는 일대 혁신으로 일컬어지며, 무의식(의식소실)과 근 이완(진통 조절)을 동시에 하는 균형 마취(balanced anesthesia)를 구성하는 핵심 요소가 되었다.

근 이완제의 사용이 일반화되면서 이와 관련된 부작용들도 증가하기 시작하였다. 1954년 Beecher와 Todd는 미국 Massachusetts 주의 대형 종합병원에서 10년간 발생한 마취와 수술이 연관된 사망 사례에 대한 분석을 발표하는데, 마취와 연관된 사망 사례에서 근 이완제가 사용된 경우에는 소 수술(minor surgery)의 경우 2배, 대 수술(major surgery)의 경우에는 6.6배 이상의 높은 위험도가 있다고 보고되면서 근 이완제의 안전한 사용에 대하여 임상의사들의 관심이 집중되기 시작하였다[2].

Corresponding author: Sang-Ku Park

Department of Neurosurgery, Konkuk University Medical Center, 120-1

Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05030, Korea

E-mail: sk39.park@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0546-9014>

근 이완제의 사용에 따른 사망률(mortality)과 이환율(morbidity)의 증가는 근 이완제에 대한 임상 약리학적 지식 부족과 수술 후 잔류 근 이완(postoperative residual curarization, PORC) 효과의 위험성에 대한 이해 부족 그리고, 신경근 감시에 대한 표준이 제정되어 있지 않음에 기인한다.

수술 중 신경손상을 최소화하고, 감각신경과 운동신경에 영향을 주지 않으면서 수술이 진행되도록 수술하는 동안 유발전위, 근전도, 뇌파, 뇌혈류 등의 검사를 진행하면서 환자의 상태를 감시하는 신경계 추적감시(intraoperative neurophysiological monitoring, INM)검사는 마취에 의한 영향을 많이 받는다. 그 중에서도 근 이완제의 영향을 가장 많이 받는다. 하지만 수술 중 근 이완제를 사용하여야 하는 정도에 대한 표준 기준이 없고, 수술이 종료되었을 때 환자의 체내에서 근 이완제가 모두 대사되었는지 여부를 평가하는 신경근 감시에 대한 표준도 없는 실정이다. 환자의 연령, 성별, 체중 등 환자의 상태에 따라서 마취제 또는 근 이완제를 적정량 투여하면 마취가 투여량만큼 마취 심도가 유지되는 것이 아니고 환자마다 체내에서 약물을 대사시키는 대사능력이 다르고 약리 기전의 시간이 다르므로 마취제의 용량을 정량화시킬 수 없는 어려운 점이 있다. 그러므로 마취과에서 수술 중 근 이완의 정도를 측정하는 신경근 감시는 어떻게 하고 있는지 그리고 신경근 감시에 대하여 국내 상황뿐만 아니라 국제적으로 어떠한 기준들이 있는 살펴보아서 수술 중 근 이완 상태가 적절하게 유지되고, 수술 후 잔류 근 이완제가 남지 않도록 하며 수술 중 신경손상 여부를 정확하게 파악할 수 있도록 도움을 주고자 한다.

본 론

1. 신경근 감시 방법과 신경계 추적 감시 검사

수술 중 전신마취를 하였을 때 수술로 인한 자극으로 인하여 환자가 움직이게 되는 경우가 있다. 환자가 완전히 깨어난 것은 아님에도 불구하고 국소적인 반사 증추에 의하여 환자가 움직여리는 것이다. 이러한 경우 근 이완제를 동시에 투여하면 의식의 소실 역할을 하는 주마취제의 투여 용량을 감소시킬 수 있고, 근 이완제가 근육을 부드럽게 하여서 기관 내 삽관을 원활하게 할 수 있고, 수술하는 부위를 절개하거나 벌리는 등으로 인한 수술 시야 및 수술적 환경(operating conditions)을 향상시킬 수 있으며, 수술 중 기계적 조절 환기(controlled mechanical ventilation) 시 환자 호흡 관리가 매우 원활하게 된다. 이러한 이유 때문에 근 이완제를 사용한다[3, 4].

수술 중 근 이완제를 사용하였으면 수술 후 반드시 잔류 근 이

완 상태 없이 근 이완제의 효과가 모두 소실되도록 하여야 한다. 일반적으로 수술 이후 근 이완 상태가 회복되었는지를 평가하는 방법으로 혀 내밀기, 머리 들기, 손을 쥐는 힘, 다리 들기 등의 임상인 방법들을 사용하였으나 이는 객관적이지 못하고 개인적인 차이가 큰 탓에 실제 근 이완 정도와 일치하지 않는 경우가 많아 수술 후 잔류 근 이완의 발생이 빈번하였다[5, 6].

근 이완에서 회복되었다는 증거로서 혹은 잔류 근 이완이 없다는 증거로서 환자가 눈을 뜨거나, 팔을 들어보라고 주문하거나, 충분한 일회 호흡량을 호흡하는지 등을 기준으로 사용한다. 그러나 이러한 검사법들은 근 이완 회복을 평가하기에 적합하지 않다[7-10]. 한 환자가 이러한 검사법을 완벽히 수행하지 못할 때 마취과의사는 환자가 잔류 근 이완 상태인지 진정제의 효과인지 명확히 구분할 수 없다. 반면에 많은 환자들은 잔류 근 이완의 기준에 해당하는 상태에 있음에도 불구하고 이러한 검사를 성공으로 수행하는 경우도 있다[11].

이러한 잔류 근 이완을 예방하기 위하여 수술 중 근 이완제는 atracurium이나 vecuronium 같은 짧은 시간 동안만 작용하는 근 이완제를 사용함에도 불구하고 수술 후 회복실에서 잔류 근 이완은 비교적 빈번하게 발생하고 있으며, 이러한 상황은 환자에게 불편을 초래할 뿐만 아니라, 수술 후 폐 합병증이 발생할 수 있다[12, 13].

기존 연구에 의하면 잔류 근 이완의 발생률은 9~42%로 근 이완제의 종류와 신경근 감시 방법 등에 따라 다소 차이가 있다 [14, 15]. 임상인의 경험적인 방법을 사용하는 경우에 잔류 근 이완을 발견하기 힘들고 또한 처치가 어렵다는 사실은 기존의 연구에서 이미 밝혀져 있다[13]. 잔류 근 이완의 발생을 감소시키기 위해서는 수술 중에 신경근 감시를 하는 것이 가장 기본적인 방법이며 그 중에서도 정량인 방법이 가장 좋은 방법이다[16, 17].

하지만 근육이 완전히 이완된 상태에서는 신경계 추적 감시 검사로 인한 전기 자극에 대하여 반응이 적절하게 이루어지지 않는다. 그러므로 신경계 추적 감시 검사가 원활한 상태를 유지하는 농도로 근 이완제를 적게 사용하면서 마취를 진행해야만 한다. 그리고 마취 중 사용되는 흡입마취제, 정맥마취제, 심혈관계 약제, 항생제 등이 근 이완제의 작용을 강화시킬 수 있다는 점도 고려해야 한다. 이러한 점들 때문에 같은 양을 투여해도 사람에 따라 근 이완 정도가 달라질 수 있으며, 근 이완의 정도를 예측하는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 근 이완제의 투여량으로 판단하지 말고, 항상 신경근 감시 검사로 근 이완 상태를 판단해야 한다[18].

근 이완 상태를 측정하는 신경근 감시 방법과 신경계 추적 감시 검사의 관계에 대하여 알아보자.

2. 신경근 감시 방법

신경근 감시에 대한 역사는 매우 짧은 편이다[1, 18]. 임상에서 신경근 감시가 주로 활용되는 목적은 첫째, 근 이완제의 발현 시간을 확인하기 위해서이고, 둘째 수술 중 근 이완 깊이를 확인하기 위해서이며, 마지막으로 수술 종료된 이후 잔류 근 이완의 위험성을 배제하기 위하여 회복기 환자를 평가하기 위해서이다. 특히, 마지막은 중요한데 근 이완제 길항 시작을 확인하고 길항제의 투약 용량을 결정하며, 잔류 근 이완이 없는지 확인하기 위하여 필요한 시기이다. 환자가 마취에서 회복되는 동안 적절한 자발 호흡의 회복과 기도 유지가 중요하다[19].

Christie 등은 근 이완제가 사용된 환자에서 수술 후 지속된 무호흡(prolonged apnea) 사례가 증가하는 것을 보고 기존의 통상인 임상 검사법만으로는 중추신경계에 영향을 미치는 중추요인(마취제, 마약류 등)과 근 이완제의 잔류 효과에 의한 말초

Figure 1. Ulnar nerve stimulation.

Figure 2. Facial nerve stimulation.

요인을 구분할 수 없다는 것을 알게 되었다. 따라서 이를 감별하기 위해서 근 이완제를 사용한 환자에서 말초 신경 자극기의 도입을 주장하였다[20].

1971년 Ali 등이 근 이완제 잔류 효과의 양적인 측정방법으로서 사연속자극비(train-of-four ratio, TOF-ratio)를 이용하는 방법을 제시하였고, 기저 값(baseline value)이 필요하지 않고 측정 가능하므로 편리하여 오늘날 신경근 감시의 표준 방법으로 정착되었다[21].

3. 사연속자극비(train of four stimulation ratio, TOFR)

사연속 자극은 2 Hz로 4회 자극을 주어서 4번째 연속을 첫 번째 연속에 비교함으로써 단순 연속에서처럼 꼭 대조 연속 없이도 T4/T1 비율로 근 이완의 상태를 평가할 수 있다. 말초신경의 자극방법으로서 팔목에서 자신경(ulnar nerve)에 자극을 주어서 새끼벌림근(abductor digiti minimi)과 엄지모음근(adductor pollicis muscle)의 수축을 관찰하거나, 안면신경(facial nerve) 또는 뒤정강신경(posterior tibial nerve)에 자극을 주어서 근 수축 정도를 측정하여 신경근 기능을 감시할 수 있다(Figure 1~3). 측정가구는 자동으로 측정되는 neuromuscular transmission module (M-NMT Module, Datex-Ohmeda, Helsinki, Finland)과 수동으로 측정해야 transcutaneous nerve stimulation (EZStim II, Life-Tech, USA)을 사용하였다(Figure 4, 5). 이것은 “fade” 현상의 일종으로 같은 세기의 자극을 연속하여 주면 첫 번째 자극에 비하여 다음 자극에 반응하는 능력이 처음보다는 감소하게 되는 현상을 이용하는 것이다. 즉, 마취의 심도가 깊어서 환자의 근 이완 정도가 심하면 4회의 연속 자극을 주어도 아무런 반응을 감지할 수 없고, 근 이완 정도가 약하면 4회의 연속 자극에 모두 반응하는 것을 관찰할 수 있

Figure 3. Posterior tibial nerve stimulation.

Figure 4. Neuromuscular transmission module (M-NMT Module, Datex-Ohmeda, Helsinki, Finland).

다. 신경계 추적 감시에서는 수술의 종류에 따라 유지해야 하는 마취의 심도가 조금씩 다르다. 그리고 자동으로 측정되는 4연속 자극기로 환자의 상태를 측정하는 것은 마취과 입장에서는 편리하고 매우 규칙적으로 검사가 가능하다[22].

4. 신경근 감시의 방향 제시

1) 수술 중 신경근 감시의 실제

실제로 마취과에서 수술 중 신경근 감시를 시행해 보면 환자의 근 이완 상태와 잘 맞지 않는 경우가 종종 있다. 따라서, 임상 상황과 일치하지 않는 측정값을 경험하면서 신경근 감시에 대한 신뢰성의 저하를 초래하고 있다. 모든 임상 검사법이 갖추어야 할 조건은 정확도(accuracy)와 정밀도(precision)이며, 이 두 가지를 동시에 만족해야 한다. 참값에 근접하는 측정값을 구할 수 있어야 하며(accuracy) 동시에 반복인 측정값들 간의 유사도가 높아야 한다. 신경근 감시를 수행할 때 이러한 정확도와 정밀도를 떨어뜨리는 원인은 1) 장비의 설정(setup)과 측정 부위의 고정(fixation), 2) 보정(calibration) 절차, 3) 최대상 자극(supramaximal stimulation), 4) 감시 부위의 선택 등이 제대로 이루어지지 않았을 때이다[23].

2) 신경근 감시의 정확도와 정밀도를 향상시키는 방법

장비의 설정 과정에서 가장 중요한 요점은 한 전극의 위치와 측정 부위를 충분히 고정하는 것이다. 신경근 감시를 위한 전용 전극이 출시되어 있으나 비싼 가격과 쉽게 구하기 어렵다는 문제 때문에 일반적으로 심전도 검사에 사용하고 있는 은-염화은(Ag/AgCl) 전극이 코팅된 전극을 사용하고 있다. 전극을 부착할 때 유의할 점은 접착 전극이 가능한 작은 표면에 접촉해야 한다는 것이다. 이것은 설정된 전류가 전극을 통해서 운동 신경에

Figure 5. Transcutaneous nerve stimulation (EZStim II, Life-Tech, USA).

전달될 때 피부 저항을 극복하고 가능한 최대의 근 수축을 유발할 수 있도록 하기 위해서이다. 따라서 전극의 접촉면이 7~11 mm 이내의 것을 사용하는 것이 좋다. 목표로 하는 신경을 올바르게 자극하기 위해서 전극은 일정한 간격을 두고 부착되어야 한다. 엄지모음근의 수축을 감시하기 하여 자신경을 자극하는 경우, 전극은 자신경의 주행에 따라 배열 되어야 하며 2.5~4 cm의 간격을 둔다. 권장된 간격보다 더 멀어지거나 가까운 경우에는 자극 전류의 침투 깊이를 변화시키므로 해당 신경을 자극하지 못하거나, 다른 신경을 자극할 가능성이 있다. 전극을 연결할 때는 극성(polarity)에 유의한다. Brull 등[24]의 연구에 의하면 원위부(distal) 전극에 음극(negative)이 연결되었을 때 최적의 결과를 얻는 것으로 확인되었다.

3) 신경근 감시 주의사항

전극을 위치할 때 주의할 점의 하나는 근육을 직접 자극하지 않도록 위치시키는 것이다. 이 경우에는 비탈분극성 근 이완제를 사용할 때 특징으로 발생하는 감쇠(fade)현상이 나타나지 않고 반응의 크기도 약하다. 또한 깊은 근 이완상태에서도 반응이 소실되지 않고 약한 수축 반응이 계속 감지된다. 따라서 불필요하게 과다한 근 이완제의 투여가 될 우려가 있으니 유의해야 한다. 근가속도검사(acceleromyography, AMG)는 해당 근육의 자유로운 움직임이 보장되어야 정확한 검사가 가능한데 실제 수술 중에 환자들은 수술용 소독포(surgical drape)로 덮여 있거나 외과의사의 신체와 자주 접촉하여 움직임이 제한되는 경우가 많다. 부적절한 고정은 일차 관측점(primary end-point)의 획득을 어렵게 한다. 따라서 엄지를 제외한 자신경의 손가락 가

지(ulnar fingers)의 움직임을 고정하고 외과로부터 방해를 받지 않도록 일정한 간격을 두는 것이 중요하다.

한 사람의 좌우 상지(upper extremity) 사이에도 유의한 차이가 있다고 알려져 있다[24, 25]. 따라서 근 이완제의 작용을 나타내는 작용 발현 시간, 지속시간, 최대 효과 시간 등은 근육에 따라 다르게 나타난다. 정확한 기전은 알려져 있지 않으나 이러한 차이는 근육의 혈류 차이, 아세틸콜린 수용체의 밀도 차이, 아세틸콜린 유리의 차이, 아세틸콜린 분해효소 활성도의 차이, 근 섬유 조성의 차이, 신경근 접합부의 숫자, 근육의 온도 등이 영향을 미치는 것으로 추정되고 있다. 하나의 근육만을 감시하는 것은 다른 주요 근육들에 대한 근이완제의 효과의 부분적인 이미지만을 보는 것이다. 그러므로 감시의 목적에 가장 적합한 근육을 선택하고 타 부위에서의 반응 차이에 대해서 잘 이해하는 것이 중요하다. 어느 부위를 선택하든 감시 중에 부위를 바꾸는 것은 바람직하지 않으며, 서로 다른 부위에서 측정된 값들의 상관도는 일치하지 않음을 유의해야 한다. 감시 근육을 선택할 때 주의해야 할 사항 중의 하나는 신체의 부분인 마비(paralysis)가 있는 경우이다. 마비된 근육은 비탈분극성 근 이완제에 저항성을 나타내므로 이러한 근육을 감시하면 필요한 양보다 더 많은 양의 근 이완제가 투여될 위험이 있으므로 주의해야 한다 [26-30].

또 주의해야 할 것이 있는데 환자의 체온관리이다. 신경근 전달 과정에서도 체온의 감소에 따라 신경자극 전달 속도가 1°C 피부 온도가 감소할 때마다 속도는 $2\text{ m/s}/^{\circ}\text{C}$ 씩 감소하는 것으로 알려져 있고 신경전달물질의 유리 또한 온도 의존적으로 감소하는 것으로 알려져 있다. 그러므로 신경근 차단으로부터 회복을 감시하는데 있어서 일정하고 일관된 결과를 얻기 위해서는 체온 유지가 필요하다. 환자의 수술 후 저 체온을 예방하고 체온을 유지하기 위해서 기구나 장비 등을 이용한 다양한 방법이 사용되고 있으나 뚜렷하게 효과를 갖는 한 가지 방법은 없고 수술 전 보온이 비교적 효과적이라는 보고가 있는 정도이다[31]. 장 시간 수술실 대기에 노출된 부위의 피부 온도는 중심 체온보다 더욱 감소할 수 있다. 중심 체온과 신경근감시장치를 부착한 부분의 피부 온도 차이가 최대 4°C 의 차이를 보인 경우도 있다 [32, 33].

마취과에서 근 이완 상태에 대한 판단을 어떻게 하는지 살펴보면, 일반적으로 환자의 수술 자세 및 수술 침대 위치를 고려하여 양쪽 팔, 다리 중에서 가장 측정하기 편리한 곳으로 근 이완 측정 부위를 선택한다. 마취과에서는 stimulation duration 0.2 ms, stimulation intensity 30~60 mA 로 검사한다. 마취과에서 기계가 자동으로 측정하는 기계(neuromuscular trans-

mission module)를 사용하는 경우는 기계가 일정 시간간격을 두고 지속적으로 측정을 하지만 네 번의 연속 자극에 대한 비율만 측정되므로 근 이완의 상태를 정확하게 측정하지 못하는 경우도 있다. 하지만 수동으로 측정하는 기계(transcutaneous nerve stimulation)는 마취과 전기자극을 주고 선생님이 손으로 근육의 떨림 반응을 감지하는 방식이므로 실제적인 근육의 이완 상태를 더 민감하게 관찰할 수 있다. 마취 근 이완 심도가 깊어서 수술 중 신경 감시 검사가 원활하지 않는데 마취과에서는 근 이완 상태가 매우 적절하다고 판단하고 있다면, 혹시 자동으로 측정하여서 민감도가 떨어지는 경우일 수 있으므로 수동으로 측정을 요청하여 환자의 근 이완 상태 평가를 다시 확인하는 것도 환자의 실제적인 근 이완 상태를 판단하는 좋은 방법일 수 있다.

5. 신경근 감시에 관한 국내외 동향

1) 신경근 감시의 나라별 실태

신경근 감시의 중요성이 부각됨에 따라 나라별로 신경근 감시의 실태를 조사한 연구들이 계속 발표되었다. 대표적인 조사는 유럽과 미국의 마취과의사들을 대상으로 대규모로 시행된 설문조사 연구이다[34]. 전체 2,636건의 완료된 설문을 분석한 결과, 임상으로 중대한 잔류 근 이완의 발생률이 1% 이하라고 응답한 비율이 각각 64.1% (미국), 52.2% (유럽)였다. 반면, 양적(quantitative) 신경근 감시 장치의 보급률은 미국과 유럽의 차이가 크게 나타났는데 각각 22.7% (미국), 70.2% (유럽)의 비율이었다. 한편, 장비를 보유한 센터에서 신경근 감시장치를 사용하고 있는 비율은 각각 90.6% (미국), 80.7% (유럽)로 높은 활용도를 보였다.

2016년 Chacko와 Haldar는 영국 마취과의사들을 대상으로 시행된 설문조사의 결과를 발표하였다. 전체 응답자(602명) 중에서 단지 31.7%만이 신경근 감시를 임상으로 수행한다고 응답했으며[35], 8.9%는 사용하지 않는다고 하였고 이중에서 50.2%는 임상적인 징후만으로 근 이완 회복을 평가한다고 응답했다. 저자들은 2007년에 시행된 이전의 설문과 비교해서 신경근 감시의 비율이 증가한 것으로 평가하였으며[36], 근 이완제와 근 이완의 효과를 없애는 길항제의 용량 적정을 위해서 양적인 신경근 감시가 필요하다는 인식이 높아진 덕분이라고 해석하였다.

신경근 감시에 대한 국내의 사정은 다른 면모를 보인다. 대한 신경근연구회(Korean Neuromuscular Meeting, <http://knmr.or.kr/>)는 근 이완제 사용과 감시에 하여 2008년과 2013년(unpublished) 두 차례 설문조사를 시행하였다[37].

신경근 감시를 표준 마취 감시법으로써 적용하게 된다면 잔류 근 이완의 발생빈도를 감소시킬 수 있다고 응답한 비율이 각각 78.2% (2008년), 74.4% (2013년)로서 비슷한 비율이 이었다. 그럼에도 불구하고 실제로 근 이완 회복을 감시하는 일상 수기로서 transcutaneous nerve stimulation (EZStim II, TOF-Watch)과 같은 양적 신경근 감시장치를 이용하고 있는 비율은 각각 16.7% (2008년), 24.7% (2013년)에 불과하였다. 근 이완 회복을 감시하기 위하여 객관적 신경근 감시장치가 반드시 수술실에 구비되어야 한다고 응답한 비율은 각각 83.3% (2008년), 84.7% (2013년)로 비슷했지만, 실제로 상시 활용 가능한 장비가 수술실 3대 또는 그 이상에서 1대인 비율은 각각 65.4% (2008년), 81.8% (2013년)로 여전히 충분한 공급이 되지 못하고 있다. 설문에 응답한 마취과의 의사가 대부분 대학병원에 근무하고 있는 점을 고려한다면 전체 보급률은 훨씬 낮을 것으로 예상되고, 실제로 수술실에서 근무하는 임상병리사들의 말을 들어 보아도 신경근 감시 없이 마취를 진행하는 병원이 상당수 존재하는 것을 알 수 있었다. 이러한 설문 결과를 요약해보면 국내의 마취과의사들의 잔류 근 이완의 위험성에 한 인식과 양적 신경근 감시 장치의 유용성을 높게 인지하고 있지만 임상현장에서 사용할 수 있는 장비의 보급이 부족하고, 보유하고 있는 장비의 활용도는 매우 낮다고 해석할 수 있다.

마취과의사들은 이미 잔류근이완에 대한 인식과 신경근 감시의 필요성에 해서 높은 공감대를 이루고 있는 상태임에도 불구하고 일상 수기로서 자리잡지 못하고 있는 것은 장비의 보급률이 낮은 것과 신경근 감시가 표준 마취 감시로 인식되지 않기 때문이다.

2) 신경근 검사에 대한 나라별 마취과 권고안

세계 마취과학회들의 연합체인 WFSA (World Federation of Societies of Anesthesiologists)는 근이완제가 투약되었을 때, 말초 신경 자극기의 사용을 권장한다는 문구를 제시하고 있다.

독일(German Society of Anesthesiology and Intensive Care, 2014)의 경우에 WFSA처럼 근이완제 사용시에 감시가 반드시 필요하다고 명시하고 있으며, 프랑스(French Society of Anesthesiology and Intensive Care, 2000)의 경우는 보다 구체적으로 기술하고 있다.

2016년 영국과 아일랜드 마취의사협회(Association of Anesthetists of Great Britain and Ireland)는 마취 표준 감시에 관한 권고안을 공식 발표하였다[38].

미국마취과학회에서 제정한 마취 감시의 표준(standards

for basic anesthesia monitoring)에 5가지 표(anesthetist, oxygenation, ventilation, circulation, body temperature)를 제정하는데 2015년 최종 수정에 신경근 감시에 한 내용은 포함되지 않았다.

국내의 사정은 매우 열악한데 환자 감시에 대한 표준 제정이 학회차원에서 이루어지지 않고, 마취통증의학 교과서에 언급된 표준은 미국마취과학회의 표준이며, 마취기록에서조차 신경근 감시에 관한 내용은 의무사항이 아니다. 그러므로 국내 병원에서 신경근 감시를 의무적으로 할 이유가 없고, 신경계 추적 감시 검사를 할 때에도 환자의 근 이완 상태를 정확하게 측정하는 신경근 감시 검사를 마취과에서 하지 않는 경우가 있을 수 있는 것이다.

결론

전신마취를 하는 수술에서 주 마취제와 더불어 근 이완제의 사용은 마취를 안정적으로 하면서 수술을 용이하게 하는 많은 장점을 갖고 있음을 알았다. 과거에 비해 더 짧은 지속시간을 갖는 근 이완제를 사용하고 있음에도 불구하고 수술이 끝난 이후에 체내에서 모두 소진되어야만 하는 근 이완 효과가 여전히 일부에서 잔류 근 이완이 존재한다[39, 40]. 근 이완제를 투여한 이후 충분히 시간이 경과하더라도 잔류 근 이완이 발생하지 않음을 보장할 수 없다. 이를 효과적으로 예방하기 위해서는 수술 중 근 이완 효과를 없애는 약제인 길항제를 투여하고 신경근 감시를 일상 수기화 해야 한다[41]. 하지만 더 효과적인 길항제가 개발된다 하더라도 수술 중 신경근 감시를 대체할 수 없으며, 수술 중 신경계 추적 감시 검사를 많이 하는 요즘에는 오히려 예전보다 더 감시가 필요한 상황이 되었다. 안전한 마취와 회복을 위하여 신경근 감시가 일상 수기가 되어야 함은 피할 수 없는 선택이다.

수술 중 신경계 감시 검사를 원활하게 하기 위해서는 마취과에서 근 이완제를 적절하게 투여하여야 하며 이러한 적정성 평가는 마취과 자체적으로 신경근 감시 검사를 해야만 이루어질 수 있다. 그리고 수술 중 신경근 감시 검사를 하여야만 수술이 종료되었을 때에도 신경근 감시 검사를 했던 자료를 기준으로 잔류 근 이완 효과가 체내에 존재하는지 유무를 명확하게 판단할 수 있다.

1. 신경계 추적 감시 검사를 위한 신경근 감시 기준 제안

사연속 자극의 반응이 약한 반응과 강한 반응 두 가지로 측정된다. 10명 이상의 환자를 대상으로 마취과 간호사와 전공의를

대상으로 수동으로 TOF를 측정된 결과와 신경계 추적 감시 장비에서의 진폭 측정 결과를 비교평가하여 보았고, 500 μ V 이상의 진폭이 측정되어야 약한 반응, 1 mV 이상의 진폭이 측정되어야 강한 반응이라는 결론을 얻었다. 신경계 추적 감시에서는 약한 반응이 아니라 강한 반응으로 측정이 되는 것이 중요하다. 이유는 약한 반응으로 4연속 자극 모두에 반응이 있는 마취의 상태(TOF 4/4) 보다 4연속 자극에 한 번 또는 두 번의 강한 반응이 있을 때(TOF 2/4)에 신경계 추적 감시 검사가 매우 원활하게 측정이 되기 때문이다. 수술 중 신경계 추적 감시 검사를 할 경우 마취과에 환자의 근 이완 상태를 4연속 자극 T4/T2 비율로 50% 정도를 유지하도록 요청하면 두 번의 강한 반응이 측정되는 것과 같은 상태이므로 신경계 추적 감시 검사가 원활하게 된다. 그러므로 4연속 자극 T4/T2 비율로 50%라는 기준을 추천한다[21, 42] (Figure 6).

2. 신경계 추적 감시 검사를 위한 신경근 감시 방법 제안

신경근 감시 주의사항에서 알아 보았듯이 신경근 감시 검사 측정 값이 한 사람의 좌우 상지(upper extremity) 사이에도 유의한 차이가 있다고 알려져 있다. 그러므로 마취과에서 한쪽 상지에서 신경근 감시를 하는 방식은 환자의 근 이완 상태를 정확하게 파악하지 못할 수 있는 위험요소를 갖고 있는 것이다. 수술 중 신경계 추적 감시 검사항목 중에서 체성감각 유발전위(somatosensory evoked potential, SSEP)의 전기자극방식을 그대로 이용하고, 운동유발전위(motor evoked potential, MEP)의 측정 전극을 이용하면 한 환자의 사지에서 근 이완 반응을 측정할 수 있다[43-46]. 이러한 방식으로 환자의 근 이완 상태를 측정하면 사지에서 측정되는 값이 조금씩 다른 유의한 차이를 극복할 수 있다. 특히 앞에서 주의사항으로 언급하였던 신체의 부분인 마비(paralysis)가 있는 경우와 수술 도중 환자의 부분적인 신체 체온 손실에 의한 영향도 감별할 수 있다.

Figure 6. Position of stimulating electrodes over the median nerve at the wrist and recording electrodes within abductor pollicis brevis muscle for recording CMAP responses.

일반적으로 사용하고 있는 수술 중 신경계 추적 감시 체성감각 유발전위 검사의 자극 부위를 그대로 사용한다. 상지 검사를 할 때에는 검사 부위 해당 손 엄지모음근(abductor pollicis muscle)으로 하고 stimulation duration 0.2 ms, stimulation intensity 20 mA로 조금 강하게 자극을 하고, 하지 검사를 할 때에는 검사 부위 해당 발바닥 엄지발가락(abductor hallucis muscle)으로 하고 stimulation duration 0.2 ms, stimulation intensity 30~40 mA로 조금 강하게 자극을 하여 반응을 측정한다.

그러므로 마취과에서 근 이완 상태를 측정하는 것과 별도로 신경계 추적 감시 검사에서도 근 이완 상태 감시를 추가적으로 시행하여서 보다 정확한 근 이완 상태를 파악하여 원활한 신경계 추적 감시 검사가 되도록 하고, 마취과에서 시행하는 신경근 감시 검사 측정 값이 올바른지 여부도 파악하여, 수술 이후 잔류 근 이완이 되지 않도록 마취과에 도움을 줄 수 있기를 바란다 (Figure 7).

3. 수술 후 잔류 근 이완 평가 방법 제안

수술이 종료될 때 즈음에, 다음과 같은 측정값으로 수술 이후 잔류 근 이완이 소실될 것을 예측할 수 있다. 첫째, 마취과에서 측정하는 4연속 자극 모두에 반응이 있는 마취의 상태(TOF 4/4)이고, 둘째, 마취과에서 주마취 심도를 측정하는 bispectral index (BIS)의 수치가 가벼운 진정 상태인 60~80보다 높은 수치를 보이고, 셋째, 운동유발전위(motor evoked potential, MEP)의 측정값이 상지와 하지에서 각각 mV 값으로 측정될 정도로 진폭이 크게 반응하고, 넷째, 체성감각 유발전위(somato-

Figure 7. The upper limb stimulates the median nerve and records in the adductor pollicis muscle, and the lower limb stimulates the posterior tibial nerve and records in the abductor hallucis.

sensory evoked potential, SSEP)검사에서 전기 자극을 줄 때 자극이 들어가는 손목과 발목의 근 이완이 원활하여 말초 신경의 흥분이 육안으로 관찰될 정도로 움직임이 관찰된다면, 주마취와 근 이완 모두 매우 얇은 상태라는 것을 의미하므로 수술 후 잔류 근 이완이 남지 않고 환자가 마취에서 의식을 원활하게 회복할 수 있을 것이다. 단, 이러한 네 가지의 평가 방법과 실제 수술 후 잔류 근 이완 평가에 대한 연구 보고가 없으므로 앞으로 연구해 볼 필요성이 있다.

요약

마취는 의식의 차단 역할을 하는 주 마취제와 감각, 운동, 반사의 차단을 하는 부 마취제인 근이완제로 구분된다. 깊은 의식의 차단만으로는 심한 자극에 대한 반응을 막을 수 없고, 다량의 진통제만으로는 무의식을 보장할 수 없다. 그러므로 마취는 동시에 두 가지를 모두 만족시켜야 한다. 근 이완제는 흡입 또는 정맥마취제의 투여 용량을 감소시키면서 기관지내 삽입관, 수술 시야 및 수술적 환경(operating conditions)을 향상시킬 수 있으며, 수술 중 기계적 조절 환기(controlled mechanical ventilation) 시 호흡 관리를 위하여 매우 중요하다. 이러한 근 이완제는 투여 용량이 과다하면 수술 중 신경 검사가 안 되는 영향을 줄 수 있고, 투여 용량이 부족하게 되면 환자가 수술 중 움직임 수 있어서 근 이완 마취 심도와 수술 중 감시 검사는 밀접한 관계가 있다. 근 이완제를 많이 사용하면, 수술 중 신경생리학적 검사가 원활하게 되지 않는 단점과 수술 이후에 완전히 근 이완 효과를 제거하기 어렵다는 단점도 갖고 있다. 수술 중 감시 검사를 하는 수술에서 마취과에서는 어떠한 기준으로 근 이완제를 투여하며 유지하는지에 대하여 국내뿐만 아니라 전 세계적인 동향을 살펴 봄으로써 보다 원활한 수술 중 신경 검사가 되길 바란다.

Acknowledgements: None

Conflict of interest: None

Author's information (Position): Kim SH¹, M.T.; Park SB², M.T.; Kang HC³, Professor; Park SK⁴, M.T.

REFERENCES

- Griffith HR, Johnson GE. The use of curare in general anesthesia. *Anesthesiology*. 1942;3:418-420.
- Beecher HK, Todd DP. A study of the deaths associated with anesthesia and surgery: based on a study of 599, 548 anesthetics in ten institutions 1948-1952, inclusive. *Ann Surg*. 1954;140:2-35. <https://doi.org/10.1097/00006558-195407000-00001>
- Madsen MV, Staehr-Rye AK, Claudius C, Gätke MR. Is deep neuromuscular blockade beneficial in laparoscopic surgery? Yes, probably. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2016;60:710-716. <https://doi.org/10.1111/aas.12698>
- Meakin GH. Role of muscle relaxants in pediatric anesthesia. *Curr Opin Anaesthesiol*. 2007;20:227-231. <https://doi.org/10.1097/ACO.0b013e328108f430>
- Ali HH, Utting JE, Gray TC. Quantitative assessment of residual antidepolarizing block. I. *Br J Anaesth*. 1971;43:473-477. <https://doi.org/10.1093/bja/43.5.473>
- Seo HJ, Lee YK, Lee SS, Kim KS, Yang HS. A survey of postoperative residual neuromuscular block and neuromuscular monitoring. *Anesth Pain Med*. 2010;5:70-74. <https://doi.org/10.17085/apm.2018.13.1.47>
- Fruergaard K, Viby-Mogensen J, Berg H, El-Mahdy A. Tactile evaluation of the response to double burst stimulation decreases, but does not eliminate, the problem of postoperative residual paralysis. *Acta Anaesthesiol Scand*. 1998;42:1168-1174. <https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.1998.tb05271.x>
- Mortensen CR, Berg H, El-Mahdy A, Viby-Mogensen J. Perioperative monitoring of neuromuscular transmission using acceleromyography prevents residual neuromuscular block following pancuronium. *Acta Anaesthesiol Scand*. 1995;39:797-801. <https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.1995.tb04173.x>
- Shorten GD, Merk H, Sieber T. Perioperative train-of-four monitoring and residual curarization. *Can J Anaesth*. 1995;42:711-715. <https://doi.org/10.1007/BF03012670>
- Bevan DR. Monitoring and reversal of neuromuscular block. *Am J Health Syst Pharm*. 1999;56(11 Suppl 1):10-13. <https://doi.org/10.1093/ajhp/56.S10>
- Murphy GS, Brull SJ. Residual neuromuscular block: lessons unlearned. Part I: definitions, incidence, and adverse physiologic effects of residual neuromuscular block. *Anesth Analg*. 2010;111:120-128. <https://doi.org/10.1213/ANE.0b013e328181da832d>
- Berg H, Roed J, Viby-Mogensen J, Mortensen CR, Engbaek J, Skovgaard LT, et al. Residual neuromuscular block is a risk factor for postoperative pulmonary complications. A prospective, randomized, and blinded study of postoperative pulmonary complications after atracurium, vecuronium and pancuronium. *Acta Anaesthesiol Scand*. 1997;41:1095-1103. <https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.1997.tb04851.x>
- Debaene B, Plaud B, Dilly MP, Donati F. Residual paralysis in the PACU after a single intubating dose of nondepolarizing muscle relaxant with an intermediate duration of action. *Anesthesiology*. 2003;98:1042-1048. <https://doi.org/10.1097/0000542-200305000-00004>
- Baillard C, Gehan G, Reboul-Marty J, Larmignat P, Samama CM, Cupa M. Residual curarization in the recovery room after vecuronium. *Br J Anaesth*. 2000;84:394-395. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.bja.a013445>
- Lee JS, Han SY, Cho SH, Chung JW, Kim SH, Chai WS, et al. Postoperative residual curarization in the recovery room after vecuronium or rocuronium use. *Anesth Pain Med*. 2006;1:101-105.
- Mortensen CR, Berg H, El-Mahdy A, Viby-Mogensen J. Perioperative monitoring of neuromuscular transmission using acceleromyo-

- graphy prevents residual neuromuscular block following pancuronium. *Acta Anaesthesiol Scand*. 1995;39:797-801. <https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.1995.tb04173.x>
17. Scott MJ, Baldini G, Fearon KC, Feldheiser A, Feldman LS, Gan TJ, et al. Enhanced Recovery After Surgery (ERAS) for gastrointestinal surgery, part 1: pathophysiological considerations. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2015;59:1212-1231. <https://doi.org/10.1111/aas.12601>
 18. Baillard C, Clec'h C, Catineau J, Salhi F, Gehan G, Cupa M, et al. Postoperative residual neuromuscular block: a survey of management. *Br J Anaesth*. 2005;95:622-626. <https://doi.org/10.1093/bja/aei240>
 19. Lee SH. What anesthesiologists ask to know and should know about the neuromuscular monitoring: an updated review. *Anesth Pain Med*. 2017;12:1-8. <https://doi.org/10.17085/apm.2017.12.1.1>
 20. Christie TH, Churchill-Davidson HC. The St. Thomas's Hospital nerve stimulator in the diagnosis of prolonged apnoea. *Lancet*. 1958;1:776. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(58\)91583-6](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(58)91583-6)
 21. Ali HH, Utting JE, Gray TC. Quantitative assessment of residual antidepolarizing block. I. *Br J Anaesth*. 1971;43:473-477. <https://doi.org/10.1093/bja/43.5.473>
 22. Park SK, Lim SH, Park CW, Park JW, Kim DJ, Kang JH, et al. Intra-operative neurological monitoring and anesthesia. *Korean J Clin Lab Sci*. 2012;44:184-198.
 23. Fuchs-Buder T, Claudius C, Skovgaard LT, Eriksson LI, Mirakhor RK, Viby-Mogensen J. Good clinical research practice in pharmacodynamic studies of neuromuscular blocking agents II: the Stockholm revision. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2007;51:789-808. <https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.2007.01352.x>
 24. Michaud G, Trager G, Deschamps S, Hemmerling TM. Dominance of the hand does not change the phonomyographic measurement of neuromuscular block at the adductor pollicis muscle. *Anesth Analg*. 2005;100:718-721. <https://doi.org/10.1213/01.ANE.0000144067.42615.AD>
 25. Claudius C, Skovgaard LT, Viby-Mogensen J. Arm-to-arm variation when evaluating neuromuscular block: an analysis of the precision and the bias and agreement between arms when using mechanomyography or acceleromyography. *Br J Anaesth*. 2010;105:310-317. <https://doi.org/10.1093/bja/aeq162>
 26. Lee S, Yang HS, Sasakawa T, Khan MA, Khatri A, Kaneki M, et al. Immobilization with atrophy induces de novo expression of neuronal nicotinic $\alpha 7$ acetylcholine receptors in muscle contributing to neurotransmission. *Anesthesiology*. 2014;120:76-85. <https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000000025>
 27. Kim KS, Jeon JW, Koh MS, Shim JH, Cho SY, Suh JK. The duration of immobilization causes the changing pharmacodynamics of mivacurium and rocuronium in rabbits. *Anesth Analg*. 2003;96:438-442. <https://doi.org/10.1097/0000539-200302000-00027>
 28. Kim KS, Shim JC, Jun JH, Lee KH, Chung CW. Rabbits treated with chronic isepamicin are resistant to mivacurium and rocuronium. *Anesth Analg*. 1999;88:654-658. <https://doi.org/10.1097/0000539-199903000-00034>
 29. Kim DW, Joshi GP, White PF, Johnson ER. Interactions between mivacurium, rocuronium, and vecuronium during general anesthesia. *Anesth Analg*. 1996;83:818-822. <https://doi.org/10.1097/0000539-199610000-00029>
 30. Rohling RG, Rentsch KM, Beck-Schimmer B, Fuchs-Buder T. Risk of recurarization during retransfusion of autologous blood withdrawn after injection of muscle relaxants: a comparison of rocuronium and mivacurium. *J Clin Anesth*. 2003;15:85-90. [https://doi.org/10.1016/s0952-8180\(02\)00519-6](https://doi.org/10.1016/s0952-8180(02)00519-6)
 31. Bräuer A, Waeschle RM, Heise D, Perl T, Hinz J, Quintel M, et al. Preoperative prewarming as a routine measure. First experiences. *Anaesthesist*. 2010;59:842-850. <https://doi.org/10.1007/s00101-010-1772-0>
 32. Heier T, Caldwell JE. Impact of hypothermia on the response to neuromuscular blocking drugs. *Anesthesiology*. 2006;104:1070-80. <https://doi.org/10.1097/00000542-200605000-00025>
 33. Kim YB, Lee KC, Kim GS, and Kim HS. The effects of peripheral hypothermia on monitoring the recovery from deep neuromuscular blockade with rocuronium. *Anesth Pain Med*. 2011;6:164-168.
 34. Naguib M, Kopman AF, Lien CA, Hunter JM, Lopez A, Brull SJ. A survey of current management of neuromuscular block in the United States and Europe. *Anesth Analg*. 2010;111:110-119. <https://doi.org/10.1213/ANE.0b013e3181c07428>
 35. Chacko CJ, Haldar M. Survey on neuromuscular management. *J Anaesthesiol Clin Pharmacol*. 2016;32:122. <https://doi.org/10.4103/0970-9185.173366>
 36. Grayling M, Sweeney BP. Recovery from neuromuscular blockade: a survey of practice. *Anaesthesia*. 2007;62:806-809. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.2007.05101.x>
 37. Seo HJ, Lee YK, Lee SS, Kim KS, Yang HS. A survey of postoperative residual neuromuscular block and neuromuscular monitoring. *Anesth Pain Med*. 2010;5:70-74.
 38. Checketts MR, Alladi R, Ferguson K, Gemmell L, Handy JM, Klein AA, et al. Recommendations for standards of monitoring during anaesthesia and recovery 2015: Association of Anaesthetists of Great Britain and Ireland. *Anaesthesia*. 2016;71:85-93. <https://doi.org/10.1111/anae.13316>
 39. Kim KS, Lew SH, Cho HY, Cheong MA. Residual paralysis induced by either vecuronium or rocuronium after reversal with pyridostigmine. *Anesth Analg*. 2002;95:1656-1660. <https://doi.org/10.1097/0000539-200212000-00033>
 40. Martin R, Bourdua I, Thériault S, Tétrault JP, Pilote M. Neuromuscular monitoring: does it make a difference? *Can J Anaesth*. 1996;43:585-588. <https://doi.org/10.1007/BF03011771>
 41. Feldheiser A, Aziz O, Baldini G, Cox BP, Fearon KC, Feldman LS, et al. Enhanced recovery after surgery (ERAS) for gastrointestinal surgery, part 2: consensus statement for anaesthesia practice. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2016;60:289-334. <https://doi.org/10.1111/aas.12651>
 42. Urriza J, Arranz-Arranz B, Ulkatan S, Téllez MJ, Deletis V. Integrative action of axonal membrane explored by trains of sub-threshold stimuli applied to the peripheral nerve. *Clin Neurophysiol*. 2016;127:1707-1709. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2015.07.024>
 43. Park SK, Hyun SC, Lim SH, Park CW, Park JW, Kim DJ, et al. Basic techniques of intraoperative neurophysiological monitoring. *Korean J Clin Lab Sci*. 2013;45:77-85.
 44. Cha JK, Kim SH. The concepts of montage in somatosensory evoked potentials. *Korean J Clin Neurophysiol*. 1999;1:160-167.
 45. American Clinical Neurophysiology Society. Guideline 11C: Recommended standards for intraoperative monitoring of auditory evoked potentials [Internet]. Milwaukee: American Clinical

- Neurophysiology Society; 2019 [cited 2019 Aug 13]. Available from: <https://www.acns.org/pdf/guidelines/Guideline-11C.pdf>
46. Lim SH, Park SB, Moon DY, Kim JS, Choi YD, Park SK. Principles

of intraoperative neurophysiological monitoring with insertion and removal of electrodes. Korean J Clin Lab Sci. 2019;51:453-461. <https://doi.org/10.15324/kjcls.2019.51.4.453>