



# 갑상선 수술 중 바늘과 피부 전극을 이용한 새로운 신경감시술

부산대학교 의과대학 이비인후과학교실, 부산대학교병원 의생명연구원

신성찬, 서명구, 천용일, 이병주

## Intraoperative Neuromonitoring System Using Needle and Skin Electrode during Thyroid Surgery

Sung-Chan Shin, Myeonggu Seo, Yong-Il Cheon and Byung-Joo Lee

Department of Otorhinolaryngology, Head and Neck Surgery, Pusan National University School of Medicine, Pusan National University and Biomedical Research Institute, Pusan National University Hospital, Busan, Korea

Intraoperative neuromonitoring (IONM) has gained wide acceptance as a useful adjunct in identifying and preserving of recurrent laryngeal nerve (RLN) during thyroid surgery. The electromyographic endotracheal tube (EMG-ETT) method is the most widely used and well-validated method for thyroid IONM; however, malpositioning of the tube is a critical shortcoming of the EMG-ETT method. This is the main reason for the low positive predictive value of IONM in thyroid surgery. Needle and skin electrodes can obtain EMG signal regardless of patient position and are easy to apply during surgery and is economical compared to EMG-ETT method. New IONM system using needle or skin electrodes would be an alternative method which can overcome shortcomings of EMG-ETT.

**Key Words:** Intraoperative neuromonitoring, Needle electrode, Skin electrode

### 서론

갑상선 수술 중 반회후두신경을 보전하는 것은 매우 중요하다. 반회후두신경 손상은 목소리 변화와 연하장애를 유발하여 환자 삶의 질을 감소시킨다. 수술 중 다양한 원인에 의해 반회후두신경 손상이 발생하고 그 빈도는 1-5%로 보고되고 있다.<sup>1)</sup> 수술 중 신경을 보전하기 위해 수술 중 신경감시술(intraoperative neuromonitoring, IONM)이 발전하게 되었다. 근전도를 측정할 수 있는 전극이 부착된 기관삽관튜브(EMG endotracheal tube, ET형)로 전신 마취한 후, 수술 중 반회후두신경 또는 미주신경을 약한 전류로 자극하여 성대근에서 발생하는 근

전도를 측정하여 신경의 상태를 확인하는 방법이다. 기관삽관튜브에 근전도가 부착된 ET형은 상품화가 잘 되어 있어 가장 일반적으로 사용되는 방법이다.<sup>2-4)</sup>

최근 메타 연구에서 ET형 근전도를 이용한 신경감시술은 일시적 그리고 영구적인 반회후두신경 손상을 줄인다고 보고하고 있다.<sup>5,6)</sup> 그러나 ET형 신경감시술의 문제점은 양성예측도가 매우 다양하게 보고되어, 신뢰성과 정확성에 문제가 있다는 점이다.<sup>7)</sup> 정확성과 신뢰성이 낮은 이유는 성대근과 기관삽관튜브에 부착된 전극과의 접촉이 환자의 자세나 위치 변화에 영향을 받기 때문이다.<sup>7-9)</sup> 전극의 정확한 접촉 확인을 위한 마취의 도움이 필요하고, 이로 인해 수술 전 준비 시간이 길어지는 경향이 있다. 또한 기존의 ET형 신경감시술은 수술 전에 ET

Received March 31, 2022 / Accepted May 17, 2022

Correspondence: Byung-Joo Lee, MD, PhD, Department of Otorhinolaryngology, Head and Neck Surgery, Pusan National University Hospital, 179, Gudeok-ro, Seo-gu, Busan 49241, Korea  
Tel: 82-51-240-7675, Fax: 82-51-246-8668, E-mail: voiceleebj@gmail.com

Copyright © the Korean Thyroid Association. All rights reserved.



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.

형 기관삽관튜브로 마취하지 않으면, 수술 중에 갑자기 적용할 수 없고, 소아 환자나 기관절개술을 시행한 환자에서 적용하는데 어려움이 있다.<sup>10)</sup> 또한 이러한 ET형 신경감시술은 비용이 비싸 한국의 의료보험제도에서는 사용하는 것이 제한적으로 인정되고 있다.

최근 ET형 신경감시술의 단점을 극복하기 위한 새로운 형태의 신경감시술 방법(alternative IONM systems)이 보고되고 있다. 본 종설에서는 최근에 보고되고 있는 후두 근전도를 이용한 새로운 형태의 신경감시술 방법의 장단점 및 유용성과 최근에 보고되는 새로운 신경감시술시스템에 대해 논의하고자 한다.

## 본 론

### 새로운 신경감시술 시스템의 방법과 장점

ET형 신경감시술의 단점을 극복하기 위해 최근에 개발되고 있는 주로 전방을 통해 후두근의 근전도를 바늘이나 표면 전극을 이용하여 측정하는 방법으로 다음과 같이 분류할 수 있다(Fig. 1).<sup>11)</sup>

#### 1) 경연골바늘전극(Trans-cartilage Needle Electrode)

갑상연골의 전면에 바늘 형태의 전극을 삽입하여 후두근의 근전도를 측정하는 방법(Fig. 1A)

#### 2) 경연골표면전극(Trans-cartilage Surface Electrode)

갑상연골의 전면에 패치 형태의 표면 전극을 부착하여 후두근의 근전도를 측정하는 방법(Fig. 1B)

#### 3) 경피바늘전극(Trans-cutaneous Needle

#### Electrode, Percutaneous Needle Electrode)

경부 피부를 통해 바늘형 근전도를 갑상연골까지 삽입하여 후두근의 근전도를 측정하는 방법(Fig. 1C)

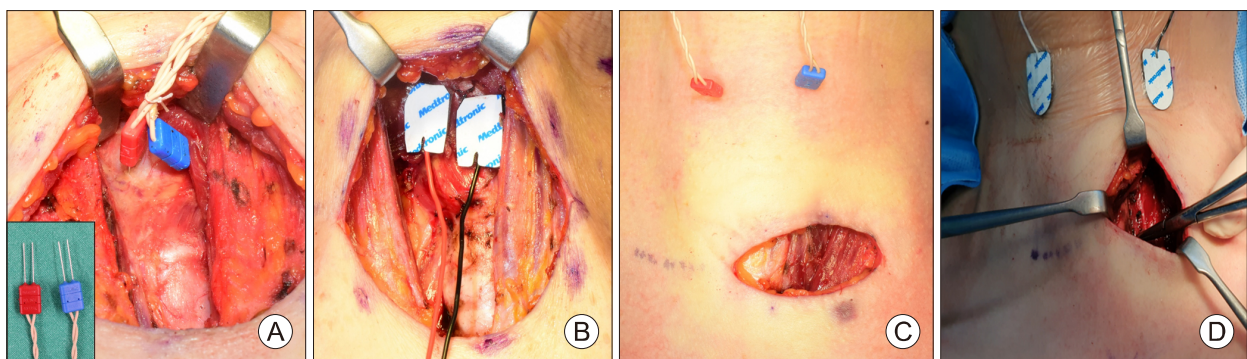
#### 4) 경피표면전극(Trans-cutaneous Surface Electrode)

갑상연골 부위의 경부 피부에 패치 형태의 표면 전극을 부착하여 후두근의 근전도를 측정하는 방법(Fig. 1D)

기존의 ET형 신경감시술은 신경 자극에 의한 성대근의 근전도를 측정하는 것이었다. 그러나 위에서 언급한 새로운 전극을 이용한 신경감시술은 성대근의 근전도보다는 후두근의 모든 근전도를 종합하여 측정하는 것으로 측정하는 근육에 다소 차이가 있다. 또한 이러한 새로운 방법은 ET형 신경 감시술에 비해 환자의 자세 변화에 영향을 받지 않아, 정확성과 신뢰성이 높고, 수술 전에 준비하지 않아도 수술 중 술자의 필요에 따라 선택적으로 사용할 수 있고, 기관절개술을 시행 받은 환자나 기관이 좁은 환자에서도 적용할 수 있다. 또한 ET형 신경감시술에 비해 경제적인 장점이 있다. 한국에서는 ET형 신경감시술이 보험적으로 모든 환자에서 적용할 수 없는 실정에서 비용적으로 싼 대체 방법은 임상들에게 많은 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다(Table 1).

#### 경연골바늘전극(Trans-cartilage Needle Electrode)

후두근의 근전도를 측정하기 위해 바늘 전극을 갑상연골에 삽입하는 방법으로 Wu 등<sup>12)</sup>이 동물 실험을 통해 처음 보고하였다. 갑상연골에 삽입된 바늘 전극은 ET형 신경감시술에 비해 높은 진폭(amplitude)을 보인다는 장점이 있다. 그리고 낮은 양성예측도를 보이는 ET형에 비해 100%의 양성예측도를 보였다.<sup>13)</sup> 그러나 바늘 삽입



**Fig. 1.** Various alternative IONM systems using needle and skin electrode. (A) Trans-cartilage needle electrode, (B) trans-cartilage surface electrode, (C) trans-cutaneous needle electrode, (D) trans-cutaneous surface electrode.

**Table 1.** 기관삽관형 전극을 이용한 신경감시술의 단점과 바늘 또는 표면 전극을 이용한 새로운 신경 감시술의 장점

기관삽관형 전극 신경감시술의 단점	바늘과 표면 전극 신경감시술의 장점
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 기관삽관튜브의 근전도 전극과 성대의 접촉이 수술 중 자세나 위치 변화에 영향을 받아 정확성과 양성 예측도가 비교적 낮다.</li> <li>2. 수술 전 근전도 전극의 정확한 위치 확인을 위한 마취의 도움의 필요성과 이로 인한 번거로움이 있다.</li> <li>3. 수술 전에 근전도 기관삽관튜브를 사용하지 않으면 수술 중에 신경감시술을 사용할 수 없다.</li> <li>4. 기관절개술이나 소아환자에서 사용하기 힘들다.</li> <li>5. 침이나 분비물이 기관삽관 전극 주위에 있으면 근전도 측정에 오류가 발생할 수 있다.</li> <li>6. 일회용 물품으로 고비용이 발생한다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 환자의 자세나 위치 변화에 대한 전극의 접촉에 영향이 적어 안정적인 진폭을 얻을 수 있다.</li> <li>2. 마취의 도움없이 쉽게 적용할 수 있어 준비 시간이 매우 짧다.</li> <li>3. 수술 전에 준비가 안된 경우에도 수술 중에 필요에 따라 쉽게 사용할 수 있다.</li> <li>4. 기관절개술이나 소아 환자에서도 사용할 수 있다</li> <li>5. 기관 내의 분비물에 대한 영향이 없다.</li> <li>6. 기관삽관형 신경감시술보다 경제적이다.</li> </ol>

**Table 2.** 바늘과 표면 전극을 이용한 새로운 신경감시술의 장단점

	장점	단점
경연골 바늘전극	1. ET형에 비해 높은 근전도 진폭을 얻을 수 있다.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 갑상연골의 전면이 박리되어야 하기 때문에 최소침습갑상선절제술에 적용할 수 없다.</li> <li>2. 바늘 삽입에 의한 출혈, 감염, 기관 튜브 손상 가능성이 있다.</li> <li>3. 골화 연골이나 재수술에 적용 힘들 수 있다.</li> </ol>
경연골 표면전극	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ET형에 비해 비슷한 근전도 진폭을 얻을 수 있다.</li> <li>2. 상후두신경의 외측 분지에 대한 평가가 가능하다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 갑상연골의 전면이 박리되어야 하기 때문에 최소침습갑상선절제술에 적용할 수 없다.</li> <li>2. 피부전극을 갑상연골 전면에 고정하는 것에 어려움이 있다.</li> </ol>
경피바늘 전극	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 갑상연골에 접촉하여 높은 근전도 진폭을 얻을 수 있다.</li> <li>2. 갑상연골의 전면의 박리가 필요 없어 최소침습갑상선절제술에도 적용할 수 있다.</li> <li>3. 긴바늘전극을 사용하는 경우 내시경 또는 로봇 수술에도 적용가능하다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 바늘 삽입에 의한 출혈, 감염, 기관 튜브 손상 가능성이 있다</li> <li>2. 골화 연골에 삽입이 힘들 수 있다.</li> <li>3. 상부 피부 피판을 견인할 때 삽입한 바늘 전극의 위치가 변화될 수 있다.</li> </ol>
경피표면 전극	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 설치가 가장 편하고 비침습적이다.</li> <li>2. 자세 변화에 영향이 적어 후두근의 진폭이 안정적이다.</li> <li>3. 갑상연골의 전면의 박리가 필요 없어 최소침습갑상선절제술에도 적용할 수 있다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 후두근전도의 진폭이 다른 방법에 비해 낮다</li> <li>2. 비만, 수술 범위, 종양의 위치에 따라 근전도 진폭이 영향을 받을 수 있다.</li> </ol>

에 의해 출혈, 감염, 기관삽관튜브의 손상 가능성이 있고, 골화가 심한 갑상연골이나 재수술에서는 바늘 삽입이 힘들 수 있다. 또한 갑상연골의 전면을 박리하여야 하기 때문에 최소침습갑상선절제술(minimally invasive thyroidectomy)과 같은 시술에서는 사용할 수 없다는 단점이 있다(Table 2).

경연골바늘전극은 ET형 신경감시술보다 후두근의 높은 진폭을 보이지만, 중앙 갑상연골보다는 외측이나 아래쪽 갑상연골의 전면에 근전도 바늘을 삽입하는 경우에서 높은 진폭을 보인다.<sup>14)</sup> 이러한 이유는 후두근이 운상피열관절(cricarytenoid joint, CA joint) 부근에 많이 부착되어 있어 운상피열관절에 가까울수록 후두근의 근전도 진폭이 높을 것으로 생각된다.

#### 경연골표면전극(Trans-Cartilage Surface Electrode)

수술 중 후두근의 근전도를 측정하기 위해 표면 전극

을 갑상연골의 전면에 부착시키는 방법이다.<sup>12)</sup> 경연골표면전극에 의한 후두근의 진폭은 ET형 신경감시술의 진폭과 비슷한 것으로 보고되었다.<sup>15)</sup> 경연골표면전극은 반회후두신경 자극에 의한 후두근의 근전도를 측정할 있다는 것 이외에도 상후두외측분지 자극에 의한 운상갑상근(cricothyroid muscle)의 근전도를 측정할 수 있다는 장점이 있으나,<sup>15)</sup> 역시 갑상연골의 전면을 박리하여야 하기 때문에 최소침습갑상선절제술에는 적용할 수 없다는 단점이 있고, 피부 전극을 갑상연골 전면에 고정하는 부분에서 다소 어려움이 있다(Table 2). 경연골표면전극의 접촉 위치는 갑상연골의 전면보다는 외측에서 높게 나온다.<sup>16)</sup> 후두근이 많이 부착하는 운상피열관절에 가까운 곳에 위치한 근전도 전극에서 높은 진폭을 보인다고 생각된다.

### 경피바늘전극(Trans-cutaneous Needle Electrode, Percutaneous Needle Electrode)

경부 피부를 통해 바늘 전극을 갑상연골까지 삽입하여 후두근의 근전도를 측정하는 개념이 동물 실험과 같이 발표되었다.<sup>17)</sup> 바늘 전극을 갑상연골까지 삽입하기 때문에 ET형 신경감시술에 비해 높은 진폭을 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 바늘 전극 삽입에 다른 출혈 또는 감염의 가능성이 있다. 그리고 바늘 전극이 피부를 통해 갑상연골에 도달하기 때문에 피부 파판을 위로 견인하게 되면 피부를 통해 삽입된 바늘 전극의 위치가 변화될 수 있다는 단점이 있다. 경피바늘전극에는 12 mm의 짧은 바늘 전극과 25-38 mm의 긴 바늘전극을 사용할 수 있다. 12 mm의 짧은 바늘 전극은 갑상연골의 전면 피부를 박리하거나 견인할 필요가 없는 최소침습갑상선절제술이나 부갑상선 수술에 적용할 수 있다.<sup>18)</sup> 일반적인 갑상선 수술에서는 갑상연골의 전면 피부를 위로 견인하기 때문에 사용하는데 제한이 있다. 25-38 mm의 긴 바늘 전극은 내시경이나 로봇 수술에서 적용할 수 있다.<sup>17)</sup>

### 경피표면전극(Trans-cutaneous Surface Electrode)

Wu 등<sup>19)</sup>은 갑상연골의 상부에 해당되는 경부 피부에 부착된 전극, 즉 경피표면전극이 후두근의 근전도를 측정할 수 있다는 것을 동물 실험을 통해 최초로 보고하였다. 이후 Lee 등<sup>20)</sup>은 경피표면전극을 이용한 임상결과를 처음으로 보고하였다. 경부 피부에 부착된 전극을 통해 후두 근전도를 측정할 수 있다면 이러한 방법이 갑상선 수술 중 신경감시술 방법 중 가장 비침습적인 방법이라고 생각된다. 또한 피부를 통해 후두근의 근전도를 측정하기 때문에 갑상연골의 전면을 박리하지 않는 최소침습갑상선절제술에도 적용할 수 있다는 장점이 있다 (Table 2).

경피표면전극을 통해 후두근전도를 측정하는 것은 다른 방법에 비해 근전도 진폭이 낮다는 단점이 있다. 그래서 Shin 등<sup>21)</sup>은 후두근이 많이 부착되어 있는 윤상피열관절에 가장 가까운 갑상연골의 외측연이 높은 진폭을 얻을 수 있는 가장 좋은 전극위치라고 보고하였다. 경피표면전극의 진폭은 수술 범위, 비만, 갑상선 종양의 위치 등에 의해 영향을 받을 수 있다는 단점이 있다 (Table 2). 신경감시술에서 신경 자극 후 근전도 반응이 없어 신경 손상을 의미하는 loss of signal (LOS)의 일반적인 기준 진폭은 100  $\mu$ V이다. 일반적으로 경피표면전극은 일반적인 ET형 신경감시술에 비해 낮은 진폭을 보이므로, LOS의 기준을 ET형 신경감시술과 같은 100  $\mu$ V로 하는

경우 LOS의 비율이 높아질 수 있다. 실제 임상에서 경피표면전극을 이용한 신경감시술 중에 마취 심도나 비만 등의 이유에 의해 100  $\mu$ V보다 낮은 진폭이지만, 신경 손상이 없는 경우가 있다. 그래서 경피표면전극을 사용할 경우에는 ET형 신경감시술과는 다른 LOS에 대한 기준이 필요하고 이에 대한 연구 또한 필요할 것으로 생각된다.

### 새로운 신경감시시스템에 대한 시도와 미래

ET형 신경감시술의 단점을 극복하기 위해 바늘이나 피부 전극을 이용하는 새로운 방법이 소개되었다. 최근에는 바늘 전극의 문제점을 극복하기 위한 nanosheet-based microneedle을 이용한 근전도가 소개되었다.<sup>22)</sup> 이러한 모든 방법은 신경 자극에 의한 후두근의 움직임을 근전도를 통해 확인하는 방법이다. 근전도를 측정하는 것은 두 개의 전극이 모두 신체에 부착되어야 하고, 전기소작기에 의한 영향을 받는다. 이러한 근전도 측정의 단점을 극복하기 위해 신경 자극에 의한 근육 자체의 움직임을 측정하는 피에조 효과를 이용한 압력센서 및 가속도 센서를 이용한 갑상선 수술 중 신경감시술에 대한 새로운 연구가 진행되고 있다.<sup>23-25)</sup> 향후 전방 피부를 통해 후두근의 움직임을 측정하는 다양한 측정방법이 개발될 것으로 생각되고, 이러한 방법을 이용한 새로운 개념의 신경감시술이 개발될 것으로 생각된다.

## 결 론

ET형 신경감시술은 가장 대중화되어 있고, 잘 검증되어 있는 갑상선 수술 중 신경감시술 방법이다. 그러나 성대근과 기관삽관튜브의 접촉 이상에 의한 다양한 양성예측도는 ET형 신경감시술의 중요한 단점이자 극복해야 할 문제이다. 바늘전극과 표면전극을 경피 또는 경연골 접근을 통해 삽입 또는 부착하여 후두 근전도를 측정하는 갑상선 수술 중 신경감시술은 ET형 신경감시술의 낮은 양성예측도를 극복할 수 있고, 경제적으로도 이점이 있어, ET형 신경감시술의 좋은 대안으로 생각된다.

**중심 단어:** 신경감시술, 바늘전극, 피부전극.

## Acknowledgments

This work was supported by clinical research grant from Pusan National University Hospital in 2022.

## Conflicts of Interest

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

## Orcid

Sung-Chan Shin: <https://orcid.org/0000-0003-2329-0648>

Myeonggu Seo: <https://orcid.org/0000-0003-2025-2769>

Yong-II Cheon: <https://orcid.org/0000-0003-0288-0542>

Byung-Joo Lee: <https://orcid.org/0000-0001-7091-6688>

## References

- Chiang FY, Wang LF, Huang YF, Lee KW, Kuo WR. Recurrent laryngeal nerve palsy after thyroidectomy with routine identification of the recurrent laryngeal nerve. *Surgery* 2005; 137(3):342-7.
- Chiang FY, Lu IC, Kuo WR, Lee KW, Chang NC, Wu CW. The mechanism of recurrent laryngeal nerve injury during thyroid surgery--the application of intraoperative neuromonitoring. *Surgery* 2008;143(6):743-9.
- Chiang FY, Lu IC, Chen HC, Chen HY, Tsai CJ, Lee KW, et al. Intraoperative neuromonitoring for early localization and identification of recurrent laryngeal nerve during thyroid surgery. *Kaohsiung J Med Sci* 2010;26(12):633-9.
- Randolph GW, Dralle H, International Intraoperative Monitoring Study Group, Abdullah H, Barczynski M, Bellantone R, et al. Electrophysiologic recurrent laryngeal nerve monitoring during thyroid and parathyroid surgery: international standards guideline statement. *Laryngoscope* 2011;121 Suppl 1:S1-16.
- Bai B, Chen W. Protective effects of intraoperative nerve monitoring (IONM) for recurrent laryngeal nerve injury in thyroidectomy: meta-analysis. *Sci Rep* 2018;8(1):7761.
- Shin SC, Lee BJ. Utility of intraoperative neuromonitoring in thyroid surgery. *J Clin Otolaryngol Head Neck Surg* 2018;29(2):157-61.
- Dralle H, Sekulla C, Lorenz K, Brauckhoff M, Machens A, German IONM Study Group. Intraoperative monitoring of the recurrent laryngeal nerve in thyroid surgery. *World J Surg* 2008; 32(7):1358-66.
- Chiang FY, Lu IC, Chang PY, Dionigi G, Randolph GW, Sun H, et al. Comparison of EMG signals recorded by surface electrodes on endotracheal tube and thyroid cartilage during monitored thyroidectomy. *Kaohsiung J Med Sci* 2017;33(10):503-9.
- Lee HS. Setup and problem solving in intraoperative neuromonitoring of thyroid surgery. *J Clin Otolaryngol Head Neck Surg* 2018;29(2):162-6.
- Sung ES, Lee BJ. Development of the novel intraoperative neuromonitoring for thyroid surgery. *Int J Thyroidol* 2018;11(2): 109-16.
- Liu CH, Huang TY, Wu CW, Wang JJ, Wang LF, Chan LP, et al. New developments in anterior laryngeal recording technique during neuromonitored thyroid and parathyroid surgery. *Front Endocrinol (Lausanne)* 2021;12:763170.
- Wu CW, Chiang FY, Randolph GW, Dionigi G, Kim HY, Lin YC, et al. Feasibility of intraoperative neuromonitoring during thyroid surgery using transcartilage surface recording electrodes. *Thyroid* 2018;28(11):1508-16.
- Jung SM, Tae K, Song CM, Lee SH, Jeong JH, Ji YB. Efficacy of transcartilaginous electrodes for intraoperative neural monitoring during thyroid surgery. *Clin Exp Otorhinolaryngol* 2020;13(4):422-8.
- Zhao Y, Li C, Zhang D, Zhou L, Liu X, Li S, et al. Experimental study of needle recording electrodes placed on the thyroid cartilage for neuromonitoring during thyroid surgery. *Br J Surg* 2019;106(3):245-54.
- Liddy W, Lawson BR, Barber SR, Kamani D, Shama M, Soyly S, et al. Anterior laryngeal electrodes for recurrent laryngeal nerve monitoring during thyroid and parathyroid surgery: new expanded options for neural monitoring. *Laryngoscope* 2018; 128(12):2910-5.
- Zhao Y, Zhang D, Zhou L, Li S, Wang T, Li F, et al. Properties of adhesive surface arrays to thyroid cartilage for recurrent laryngeal nerve monitoring. *Ann Transl Med* 2021; 9(8):690.
- Huang TY, Lin YC, Tseng HY, Kim HY, Dionigi G, Lu IC, et al. Full percutaneous intraoperative neuromonitoring technique in remote thyroid surgery: porcine model feasibility study. *Head Neck* 2021;43(2):505-13.
- Li P, Liang QZ, Wang DL, Han B, Yi X, Wei W, et al. The transcutaneous electromyography recording method for intraoperative neuromonitoring of recurrent laryngeal nerve during minimally invasive parathyroidectomy. *Sci Rep* 2020; 10(1):7609.
- Wu CW, Chiang FY, Randolph GW, Dionigi G, Kim HY, Lin YC, et al. Transcutaneous recording during intraoperative neuromonitoring in thyroid surgery. *Thyroid* 2018;28(11):1500-7.
- Lee HS, Oh J, Kim SW, Jeong YW, Wu CW, Chiang FY, et al. Intraoperative neuromonitoring of recurrent laryngeal nerve during thyroidectomy with adhesive skin electrodes. *World J Surg* 2020;44(1):148-54.
- Shin SC, Sung ES, Kwon HK, Cheon YI, Lee M, Lee JC, et al. Investigation of attachment location of adhesive skin electrodes for intraoperative neuromonitoring in thyroid surgery: preclinical and clinical studies. *Surgery* 2022;171(2):377-83.
- Yang Y-C, Lin Y-T, Yu J, Chang H-T, Lu T-Y, Huang T-Y, et al. MXene nanosheet-based microneedles for monitoring muscle contraction and electrostimulation treatment. *ACS Applied Nano Materials* 2021;4(8):7917-24.
- Sung ES, Lee JC, Shin SC, Kwon HG, Kim MS, Kim DJ, et al. Development of a novel intraoperative neuromonitoring system using a surface pressure sensor to detect muscle movement: a rabbit model study. *Clin Exp Otorhinolaryngol* 2019;12(2): 217-23.
- Sung ES, Lee JC, Shin SC, Kwon HK, Na HS, Park DH, et al. Development of a novel intraoperative neuromonitoring system using an accelerometer sensor in thyroid surgery: a porcine

- Model Study. Clin Exp Otorhinolaryngol* 2019;12(4): 420-6.
- 25) Sung ES, Shin SC, Kwon HK, Kim J, Park DH, Choi SW, et al. Application of novel intraoperative neuromonitoring system using an endotracheal tube with pressure sensor during thyroid surgery: a porcine model study. *Clin Exp Otorhinolaryngol* 2020; 13(3):291-8.