

수술 연기 내 유해인자 노출 평가 및 제어효과 분석

서용혁¹ · 함승헌^{1,2,3*}

¹가천대학교 의과대학, ²가천대학교 보건대학원 산업 및 환경보건 전공, ³가천대학교 길병원 직업환경의학과

Assessment of Exposure to Hazardous Agents in Surgical Smoke and Evaluation of Control Effectiveness

Yong-Hyeok Seo¹ · Seunghon Ham^{1,2,3*}

¹College of Medicine, Gachon University Gil Medical Center

²Graduate School of Public Health, Gachon University

³Department of Occupational and Environmental Medicine, Gil Medical Center, College of Medicine, Gachon University

ABSTRACT

Objectives: Surgical smoke is a complex mixture of hazardous agents generated by the thermal degradation of tissue during the use of electrocautery devices or lasers. Prolonged and repeated exposure to surgical smoke may lead to respiratory disorders, headaches, eye irritation, and other adverse health effects. This study aims to quantitatively characterize the types and concentrations of major hazardous agents present in surgical smoke and to evaluate the efficacy of local exhaust ventilation (LEV) in reducing these exposures, thereby providing scientific evidence to support the development of a safer surgical environment.

Methods: Surgical smoke was generated by applying an electrocautery device to porcine tissue. The concentrations of hazardous agents were evaluated under three scenarios: (1) background conditions (Background), (2) LEV not in use (LEV OFF), (3) LEV in use (LEV ON).

Results: The surgical smoke contained hazardous agents, including particulate matter (PM), volatile organic compounds (TVOC), carbon monoxide (CO), and hydrogen sulfide (H₂S). Concentrations of these agents were significantly elevated during surgical procedures. The use of LEV resulted in a significant decrease in the concentrations of all hazardous agents, with CO and H₂S concentrations dropping to non-detectable levels.

Conclusions: The installation and proper use of LEV should be incorporated into surgical safety standards in operating rooms. Furthermore, policy discussions are necessary to move beyond advisory guidelines and pave the way for mandatory future implementation.

Key words: Surgical smoke, local exhaust ventilation, occupational health, operating room safety, hazardous agents


I. 서론

직업환경에서는 인간이 일상생활 속에서 노출되는 유

해인자에 비해 특수한 유형의 유해인자에 노출될 가능성이 높다. 그 중 의료인은 직업적 특성상 다양하고 특수한 유해인자에 노출될 수 있다. 의료인의 노출에 대

*Corresponding author: Seunghon Ham, Tel: 032-458-2634, E-mail: shham@gachon.ac.kr
Department of Occupational and Environmental Medicine, Gachon University Gil Medical Center, 21, Nadongdaero774-gil, Namdong-gu, Incheon, 21565, Republic of Korea

Received: December 15, 2025, 2025 Revised: December 30, 2025, 2025 Accepted: December 31, 2025

 Seunghon Ham <http://orcid.org/0000-0002-5167-9661>

 Yonghyeok Seo <http://orcid.org/0009-0005-7580-0939>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한 기존 연구는 알려진 유해요인에 집중되어 왔다. 영상의학적 검사 과정에서 방사선에 노출될 수 있으며, 병리학적 검체의 고정 및 보존에 사용되는 포르말데하이드 등에 노출될 수 있다. 또한 아산화질소나 할로겐화 마취제 등 흡입성 마취가스에 노출될 수 있으며 글루타르알데하이드, 1군 발암물질인 에틸렌옥사이드, 과산화수소 등 소독제, 멸균제에도 노출될 수 있다 (Dumas et al., 2017).

수술실 환경을 대상으로 한 연구는 상대적으로 제한적이며, 특히 전기수술기 사용시 발생하는 연기인 수술연기 (Surgical Smoke, electrosurgical smoke, surgical plume)에 대한 최신 연구는 여전히 부족하다. 수술연기는 전기소작(Electrocautery), 레이저 수술(Laser ablation), 초음파 절개(Ultrasonic dissection) 등의 수술기구를 조직에 사용할 때 발생하는 연기로 여러가지 유해물질을 포함할 수 있다(Zhou et al., 2023). 미세먼지(Particulate Matter, PM), 총 휘발성 유기화합물(Total Volatile Organic Compound, TVOC), 일산화탄소(Carbon Monoxide, CO), 황화수소(Hydrogen Sulfide, H₂S), 미생물(Microorganism) 등이 있다 (Benaim and Jaspers 2024). 수술실 내에서 이러한 유해물질들에 장기간 반복적으로 노출되는 경우 의료인의 건강에 잠재적인 악영향을 미칠 수 있다(Okoshi et al., 2015). 그럼에도 불구하고 수술연기를 의료인의 실제 호흡기 높이에서 측정된 정량적 데이터가 매우 부족한 실정이다(Ulmer, 2008).

수술실이라는 특수한 환경 때문에 현재까지의 연구는 대부분 정성적 자료이거나 의료인의 호흡기 위치가 아닌 수술연기 발생지점 혹은 실험실 전체 공기 중 농도를 측정한 농도가 주를 이루고 있다(Brüske-Hohlfeld et al., 2008). 또한 국소배기장치(Local Exhaust Ventilation, LEV)의 저감 효과에 대한 연구는 거의 없어 의료기관에서 LEV를 통한 개선의 필요성을 제시하기에 한계가 있다. 또한 수술연기가 위해요인이라는 인식이 전반적으로 낮다는 점 또한 중요한 문제로 보고된다(Michaelis et al., 2020).

따라서 본 연구에서는 의료인의 호흡기 높이(수술연기 발생지점으로부터 약 30 cm 거리)에서 수술연기 발생 상황을 모사하였고 공기중 유해인자(PM, TVOC, CO, H₂S) 농도를 정량적으로 측정하고, 국소배기장치의 유해인자 저감효과를 검증함으로써 수술실 내 국소배기장치 사용의 필요성을 강조하고 수술연기의 유해성

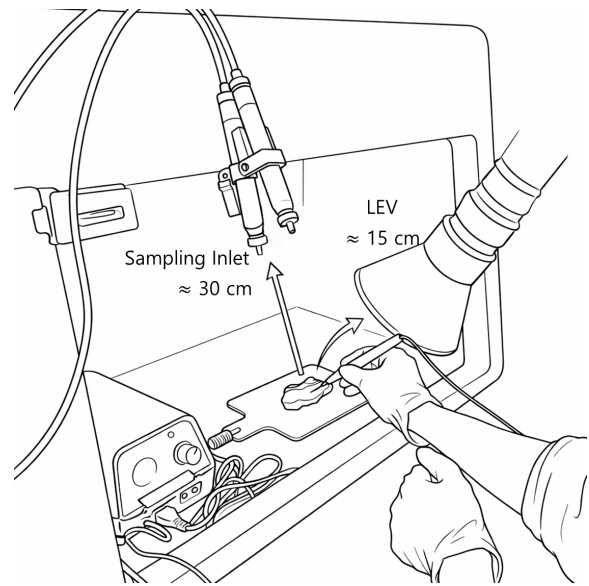


Figure 1. Schematic illustration of surgery experiments using electrocautery

에 대한 인식과 관리체계를 강화할 수 있는 근거를 마련하는 것을 목표로 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구의 내용

본 연구는 전기수술기용 전극을 패지고기 조직에 사용하여 전기소작술 중 발생하는 수술연기를 생성하였다. 해당 실험은 동일한 전기출력 조건 하에 1) 국소배기장치 미사용군(LEV OFF) 2) 국소배기장치 사용군(LEV ON) 두 가지 조건으로 나누어 수행하였다. 두 조건 모두 국소배기장치 사용 여부를 제외하고 동일한 조건에서 수행하였다.

실험은 가로 약 3.5 m, 세로 약 10.5 m, 높이 약 3 m의 실험실에서 실시하였고, 환기조건은 창문을 통해 환기를 할 수 있고 중앙공조시스템이 있으나 실험 당시에는 중앙공조시스템을 작동하지 않고 창문도 닫은 상태에서 실험을 실시하였다.

2. 연구 장비

1) 고주파 전기 수술기

본 연구는 실제 임상수술 환경과 유사한 조건을 재현하기 위해 고주파 전기 수술기(RF-70, ITC Co, Ltd, Korea)를 이용하였다. 해당 기기는 발 조작 스위치(Single Foot Switch), 다회용 전기소작기 대극판(Reusable

Patient Electrode Plate), 보비(Bovie) 등의 부속품으로 구성되어 있다.

2) 국소배기장치

실험 중 발생한 수술연기의 제거 효과를 평가하기 위해 이동식 국소배기장치(Model RG-6000, Regeni, Korea)를 사용하였으며, 최대 강도로 설정하였을 때 환기량은 약 4.7 m³/min이다. 제어속도는 1.0 m/s였다. 흡입구는 수술연기 발생지점에 최대한 가까이 배치하였고, 각도는 작업을 위하여 45도로 15 cm 거리에 배치하였다. 작동 시 실내공기 유속 변화가 유해인자 측정에 영향을 주지 않도록 설정하였다.

3) PM 측정 장비

실험 중 발생한 수술연기의 PM의 농도 및 입경분포를 측정하기 위해 광산란식 휴대용 입자분석기(Portable Aerosol Spectrometer, Model 11-A, GRIMM Aerosol Technik, Germany)를 이용하였다. 해당 장비를 통해 PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ 세 가지 크기 구간으로 분류하여 각 실험별로 6초 간격으로 데이터를 수집하여 농도를 산출하였다.

4) TVOC 측정 장비

실험 중 발생한 수술연기의 TVOC의 농도를 측정하기 위해 휴대용 광이온화 검출기(Portable Photoionization Detector, PID; ppbRAE 3000, RAE systems, USA)를 사용하였다. 이 장비는 실시간으로 TVOC의 농도변화를 ppb단위로 모니터링한다. 각 실험별로 1초 간격으로 데이터를 수집하여 농도를 산출하였다. 장비의 보정은 이소부틸렌 표준가스(Isobutylene 100 ppm)으로 실시하였다.

5) 가스상 물질 측정 장비

실험 중 발생한 수술연기의 가스상 물질의 농도를 측정하기 위해 휴대용 복합가스 검출기(Portable Multi-Gas Detector, QRAE 3, RAE systems(USA))를 이용하였다. 해당 장비는 실시간으로 CO, H₂S, O₂ 농도를 측정하며 측정값은 장치 내부 메모리에 자동 저장된다. 각 실험별로 1초 간격으로 데이터를 수집하여 농도를 산출하였다. 장비의 보정은 CO 100 ppm, H₂S 25 ppm, O₂ 18%의 표준가스로 실시하였다.

3. 연구 절차

실험 절차는 다음과 같다. 고주파 전기 수술기에 보비를 연결하고 절단모드(Pure Cut Mode)로 맞추고 강도(Intensity)를 10으로 조정하였다(70 W). 대극판 위에 돼지고기를 배치한 다음, 보비를 돼지고기 절단 부위 위에 위치시켰다. 이후 발 조작 스위치를 밟아 전기소작기를 작동시킴으로써 수술연기를 5분 간 발생시켰다.

이 실험은 국소배기장치를 미작동 상태와 작동 상태에서 각각 1회씩 수행하였으며, 배경농도(Background) 단계에서 5분간 측정, 수술(Surgery)단계에서 전기소작을 5분간 진행하여 연기를 발생시키고 농도를 측정, 수술이후(Post) 단계에서 5분간 잔여농도를 측정하여 유해인자의 잔류 여부를 평가하였다. 실시간 측정 장비는 장비가 측정할 수 있는 최소 간격으로 측정하였다. 모든 측정 장비들은 호흡기 높이(약 30 cm거리)에 흡입부를 위치시키고 실험을 진행하였다.

4. 자료분석

통계분석은 R(version 4.5.2)를 통해 진행하였다. 각 실험 단계에서 측정된 1초 또는 6초 단위의 실시간 데이터를 통계 분석의 표본으로 사용하였다. 국소배기장치 사용 전후 간 유해인자 농도 비교는 기술통계분석(평균, 표준편차, 중앙값, 5-95백분위수, 최댓값)을 통해 분포를 표현하였다.

III. 결 과

1. 국소배기장치 사용 전후 간 유해인자 농도 비교

PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, TVOC, CO, H₂S 등 총 6개 물질을 대상으로 LEV 가동 여부(OFF/ON)에 따른 농도 특성을 Background, Surgery, Post 세 구간으로 구분하여 제시하였다(Table 1). 각 구간별 기술통계는 평균과 표준편차, 중앙값, 5-95백분위수, 최댓값으로 분포를 기술하였다. LEV OFF는 수술 중 오염물질 농도의 증가 및 변동성을 평가하기 위한 기준값으로 활용하였고, LEV ON은 동일 조건에서 LEV 가동이 노출 감소에 미치는 영향을 평가하기 위하여 제시하였다.

LEV 가동 여부에 따라 농도에 있어 뚜렷한 차이를 보였다. TVOC의 경우 LEV OFF 상태에서 Background 농도는 비교적 낮고 안정적이었으나, Surgery 구간에서는 평균 농도가 급격히 상승하였으며 최댓값 역시 크게 증가하였다. 반면 LEV ON 조건에서는 Surgery 및 Post 구간

Table 1. Descriptive statistics of airborne contaminants by LEV operation across three temporal phases (Background, Surgery, Post)

Variable	LEV	Background				Surgery				Post				
		Mean (SD) *	Median	5th-95th percentile	Max.	Mean (SD)	Median	5th-95th percentile	Max.	Mean (SD)	Median	5th-95th percentile	Max.	
PM10	OFF	1.24 (0.63)	1.10	0.75-2.00	4.70	655.80 (523.65)	549.10	181.50-1,726.85	2,495.70	50.12 (82.61)	6.10	3.00-188.45	415.60	
	ON	0.43 (0.11)	0.40	0.30-0.60	0.80	3.79 (2.93)	2.95	0.79-9.36	14.20	1.20 (0.56)	1.10	0.50-2.52	3.10	
PM2.5	OFF	1.19 (0.50)	1.10	0.75-1.85	3.70	624.15 (485.47)	526.60	178.80-1,619.55	2,290.50	49.86 (81.85)	6.10	3.00-187.75	409.60	
	ON	0.43 (0.11)	0.40	0.30-0.60	0.80	3.79 (2.93)	2.95	0.79-9.36	14.20	1.17 (0.47)	1.10	0.50-2.11	2.80	
PM1	OFF	1.01 (0.19)	1.00	0.75-1.35	1.40	312.24 (132.65)	302.30	150.65-539.80	596.30	39.63 (57.91)	5.20	2.95-146.65	242.00	
	ON	0.43 (0.11)	0.40	0.30-0.60	0.80	3.77 (2.92)	2.95	0.79-9.36	14.20	1.08 (0.30)	1.10	0.50-1.50	1.60	
TVOC	OFF	237.46 (13.79)	237.00	225.70-253.00	255.00	2,298.03 (1,946.09)	1,796.00	767.55-5,356.90	13,357.00	690.87 (388.35)	592.50	448.95-1,211.60	3,251.00	
	ON	438.28 (12.19)	434.00	432.00-474.05	492.00	582.41 (56.28)	563.50	510.95-702.10	720.00	624.55 (28.68)	627.00	585.00-663.00	677.00	
H ₂ S	OFF	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	0.15 (0.31)	0.00	0.00-0.80	1.40	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	
	ON	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	
CO	OFF	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	7.76 (8.72)	3.00	0.00-24.00	26.00	0.63 (1.72)	< LOD**	< LOD**	-5.00	9.00
	ON	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	< LOD**	

*Mean(SD): mean value and standard deviation
 **LOD(Resolution): H₂S: 0.1 ppm, CO: 1 ppm

모두 낮은 농도 분포를 나타내어 변화가 감소하였다. 입자상물질(PM10, PM2.5, PM1)에서도 유사한 농도 분포가 관찰되었다. LEV OFF에서는 수술 중 및 수술 직후(Post) 높은 평균 농도가 확인되었다. 특히 PM1의 Post 구간에서 매우 큰 최대값이 측정되어, LEV 미가동 시 초미세입자 발생이 집중적으로 증가하였다. 반면

LEV ON에서는 Background-Surgery-Post 전 구간에서 농도가 매우 낮고 안정적으로 유지되었으며, 5-95백분위수 범위가 현저하게 좁아졌다.

CO는 전체적으로 낮은 수준을 보였으나, LEV OFF의 Surgery 구간에서 부분적 최대값 증가가 나타났다. LEV ON에서는 이러한 피크 현상이 없었다. H₂S는 모

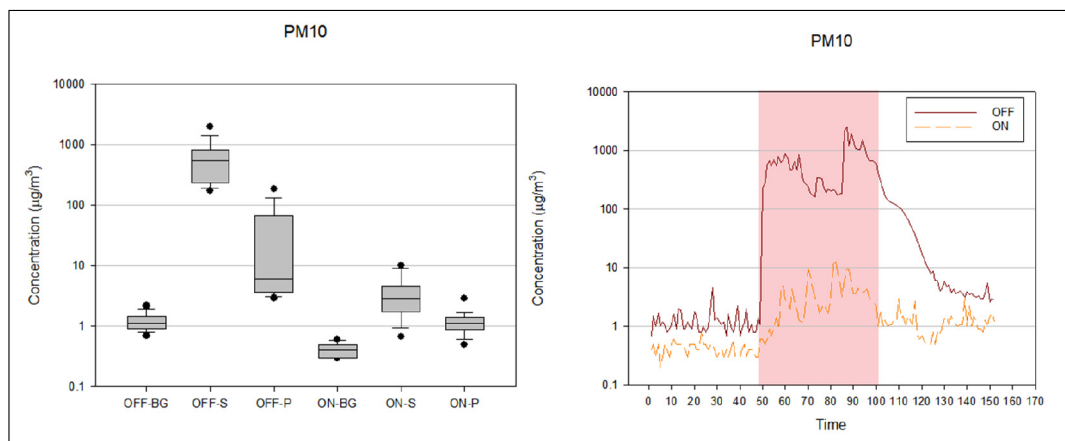


Figure 2. PM10 concentration levels measured under LEV OFF and ON conditions. (Left) Box plots showing the distribution of PM10 concentrations across background (BG), surgery (S), and post-surgery (P) phases. The median is indicated by the central line, and boxes represent the interquartile range (25th-75th percentiles). (Right) Time-series profiles of PM10 concentrations. The shaded area denotes the surgery phase.

든 구간에서 거의 검출되지 않아 LEV의 영향이 크지 않았으나, 전체 데이터의 안정성을 확인하는 지표로서 유의미하였다. O₂의 경우 전후의 차이가 없었다.

PM₁₀의 농도는 LEV OFF 조건에서 Surgery 단계의 PM₁₀의 농도가 급격히 증가하였으며, Post 단계에서도 고농도가 일정 부분 유지되는 양상을 보였다. 반면 LEV ON 조건에서는 Surgery 단계에서 일시적인 농도 증가가 관찰되었으나 최고농도는 10 µg/m³ 수준으로 제한되었고, Post 단계에서는 배경농도 수준으로 빠르게 회귀하는 것으로 나타났다(Figure 2).

PM_{2.5}의 농도는 PM₁₀과 전반적으로 유사한 경향이 확인되었다. LEV OFF 조건에서는 Surgery 단계에서 PM_{2.5}의 농도가 급격히 증가하였으며, Post 단계에서도 PM_{2.5}가 잔류하는 양상을 확인하였다. 반면 LEV ON 조건에서는 Surgery 단계에서 일시적인 상승이 나타났으나 최고농도는 10 µg/m³ 수준으로 LEV OFF 조건과 비교하였을 때 100배 차이가 낮으며 Post 단계에서는 농도가 감소하여 배경농도 수준으로 회귀하는 것으로 나타났다(Figure 3).

PM₁에서도 PM_{2.5}, PM₁₀과 유사한 경향이 확인되

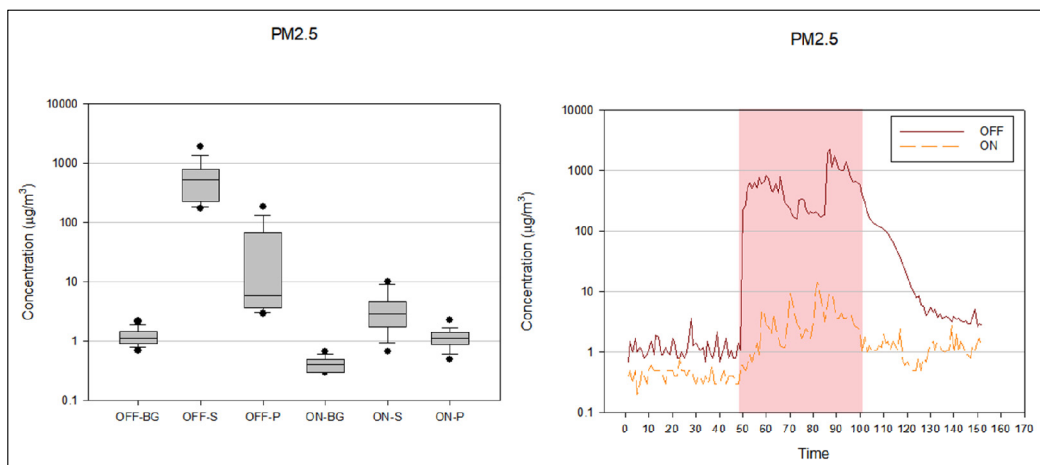


Figure 3. PM_{2.5} concentration levels measured under LEV OFF and ON conditions.

(Left) Box plots showing the distribution of PM_{2.5} concentrations across background (BG), surgery (S), and post-surgery (P) phases. The median is indicated by the central line, and boxes represent the interquartile range (25th–75th percentiles). (Right) Time-series profiles of PM_{2.5} concentrations. The shaded area denotes the surgery phase.

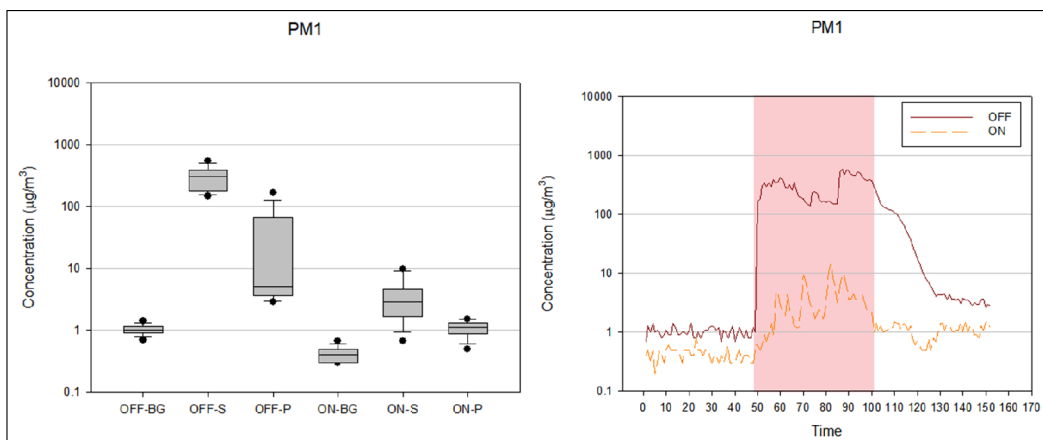


Figure 4. PM₁ concentration levels measured under LEV OFF and ON conditions.

(Left) Box plots showing the distribution of PM₁ concentrations across background (BG), surgery (S), and post-surgery (P) phases. The median is indicated by the central line, and boxes represent the interquartile range (25th–75th percentiles). (Right) Time-series profiles of PM₁ concentrations. The shaded area denotes the surgery phase.

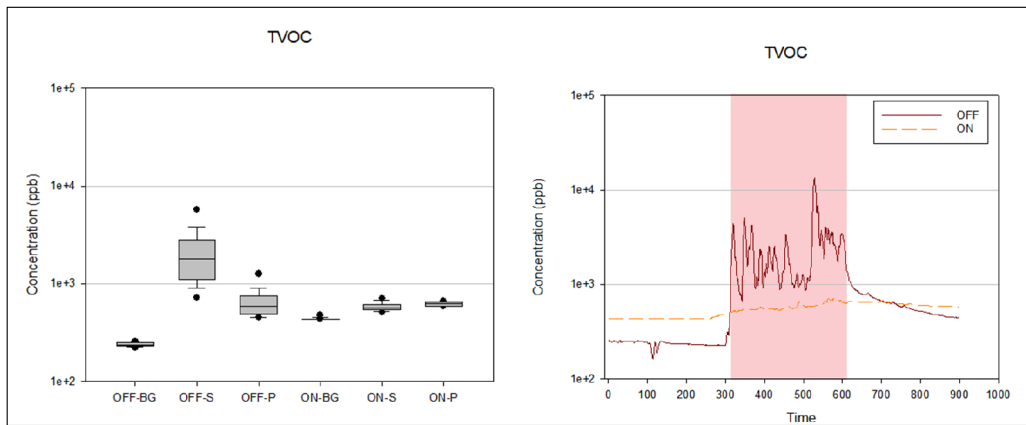


Figure 5. TVOC concentration levels measured under LEV OFF and ON conditions.

(Left) Box plots showing the distribution of TVOC concentrations across background (BG), surgery (S), and post-surgery (P) phases. The median is indicated by the central line, and boxes represent the interquartile range (25th–75th percentiles). (Right) Time-series profiles of TVOC concentrations. The shaded area denotes the surgery phase.

었다. LEV OFF 조건에서는 Surgery 단계에서 PM1의 농도가 상승하였다. PM2.5와 PM10에서는 최고농도가 $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였던 것에 대비해 상대적으로 낮은 수준을 보였다. 그러나 Surgery 단계에서 농도의 급격한 증가와 Post 단계에서의 잔류양상은 동일하게 나타났다. LEV ON 조건에서는 Surgery 단계에서 일시적인 농도 증가가 관찰되었으나 최고농도는 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 제한되었고, Post 단계에서는 배경농도 수준으로 빠르게 회귀하는 것으로 나타났다(Figure 4).

TVOC 역시 PM과 유사한 경향이 확인되었다. LEV OFF 조건에서는 Surgery 단계에서 TVOC의 농도가 급격히 증가하여 수천(ppb) 수준까지 상승하였다. 반면 LEV ON 조건에서는 Surgery 단계 중 TVOC 농도가 일시적으로 증가하였으나 수백(ppb) 수준에서 유지되며 최고농도 또한 수백(ppb) 수준으로 LEV OFF 조건에 비해 현저히 낮게 나타났다(Figure 5).

IV. 고 찰

본 연구에서는 수술연기 속 주요 유해인자의 농도가 수술 과정 중 급격히 증가함을 정량적으로 확인하였으며, 이는 전기소작술에 의해 다양한 유해인자들이 발생한다는 기존 보고들과도 부합한다(Zhou et al., 2023; Benaim and Jaspers 2024). 이러한 결과는 수술연기가 단지 불편함의 문제가 아닌 의료인의 건강에 악영향을 미칠 수 있는 직업환경적 유해인자임을 보여준다.

그럼에도 불구하고 여전히 많은 의료기관에서 수술연기가 유해인자로 충분히 인식되지 않고 그 관리가 체계적으로 이루어지지 않는 현황(Michaelis et al., 2020)을 고려할 때, 본 연구의 결과는 의료기관의 수술연기에 대한 안전 보건 교육의 강화와 관리 체계 확립의 타당성을 확보하는 데 중요한 근거자료가 될 수 있다.

본 연구에서 측정된 PM, TVOC, CO, H₂S는 전기소작기를 이용한 조직 열분해 시 공통적으로 발생하는 주요 유해인자이다. 특히 PM의 경우 호흡기 말단부까지 침투할 수 있는 초미세먼지(PM2.5)의 형태로 존재하며, 전기소작술 종료 후에도 일정 수준의 농도가 지속적으로 유지되는 양상이 나타남에 따라 의료인의 반복적·장기적 노출 가능성이 우려된다. 세계보건기구에 따르면 초미세먼지에 장기간 반복적으로 노출될 시 심혈관계 및 호흡기계 질환을 유발하고 사망률을 증가시킬 수 있다고 보고된 바 있고(WHO, 2021), 이는 수술연기에 반복적으로 노출되는 의료인에게 잠재적 건강 위해가 발생할 수 있음을 시사한다. 의료진의 실제 호흡기 높이에서 유해인자의 농도를 측정함으로써, 기존의 단순히 수술 지점 주변이나 실험실 내의 전체의 농도를 측정한 연구(Brüske-Hohlfeld et al., 2008)에 비해 보다 현실적인 개인 노출 수준을 평가하였다는 점에서 의의가 있다.

국소배기장치는 수술실 내 오염물질 농도의 절대적인 감소뿐 아니라 노출 변동성의 구조적 억제에도 중요한 역할을 수행하는 것으로 나타났다. 특히 TVOC 및 입

자상물질에서 LEV OFF 시 관찰된 급격한 농도 상승과 높은 최대값, 넓은 백분위수 범위는 수술 과정에서 발생하는 단시간 고농도 노출의 특성을 반영한다. 이러한 고농도 노출은 건강위해성 평가에서 평균 농도보다 더 중요한 지표로 평가되는 바, LEV ON 조건에서 TVOC와 입자상물질의 유의미하게 제거되었다는 사실은 실질적인 노출감소로 볼 수 있다. 또한 Post 구간에서도 LEV ON 조건은 오염물질 농도가 배경 수준에 근접하도록 신속히 회복되는 양상을 보였는데, 이는 수술 종료 이후 잔류 오염물질에 대한 노출 위험을 최소화하는 중요한 기능이라고 할 수 있다. 따라서 국소배기장치가 수술 중 및 수술 직후 발생하는 다양한 공기오염 요인에 대해 평균 노출량의 감소뿐 아니라 단시간 고농도로 발생된 유해물질의 제거와 농도 안정화라는 추가적 이점을 제공함을 실험적으로 확인하였다. 이는 수술실 안전관리의 핵심 기술로서 국소배기장치의 설치 및 운영의 필요성을 강조하는 근거로 활용될 수 있다. CO와 H₂S의 농도는 비검출 수준(non-detectable level)으로 떨어짐에 따라 가스상 물질이 입자상 물질보다 국소배기장치의 포집 기전에 더 민감하게 반응하여 높은 제거 효율을 보인 것으로 해석된다. 이는 국소배기장치가 수술연기 내 유해인자에 대한 급성·만성 노출을 줄일 수 있는 효과적인 공학적 제어수단임을 뒷받침하고, 수술연기 제거를 위한 가장 기본적인 권고 방안이 국소배기장치라는 기존 연구의 보고를 강화한다(Lee et al., 2018).

핵심적인 발견 중 하나는 수술 과정에서 발생하는 상당수의 입자상 물질이 PM₁ 이하의 초미세입자라는 점이다. 이는 일반적인 대기 환경에서 주목하는 PM_{2.5}보다 더 작은 입자가 수술실 내에서 집중적으로 생성됨을 의미하며, 의료진의 폐포 깊숙이 도달하여 전신 순환계에 영향을 줄 위험이 크다는 것을 뜻한다. 이번 실험에서 사용된 입자분석기의 측정 한계(0.3 μm)로 인해 직접적으로 관찰되지는 않았으나, 전기수술기의 고온 열분해 기전을 고려할 때 100 nm 이하의 나노입자가 대량 발생했을 가능성이 매우 높다. 나노 크기의 입자는 질량 농도보다 개수 농도가 높고 표면적이 넓어 독성학적으로 더 위험할 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 나노입자 계수기(Condensation Particle Counter, CPC) 등을 활용한 초미세 나노입자의 노출 평가가 병행되어야 할 것이다(Brüske-Hohlfeld I et al., 2008; Ham et al., 2016).

본 연구에는 몇 가지 제한점이 존재한다. 첫째, TVOC 농도는 총량으로 측정되었으므로, 포름알데하이드, 벤젠 등 발암성 및 독성이 높은 개별 VOC 성분별 분석이 추가적으로 필요하다. 둘째, 본 연구는 돼지고기 조직을 이용하여 이루어졌다는 점에서 실제 인체 수술과 본질적인 차이가 있고, 수술연기의 발생량 및 유해인자 조성이 실제 임상환경과 다를 가능성이 있다. 셋째, 본 연구는 단일 종류의 전기소작기와 강도조건 하에 1회만 수행되었기 때문에 레이저나 초음파 등 다양한 수술 장비와 전력 설정을 적용한 추가적인 연구가 필요하다. 이러한 제한점에도 불구하고 본 연구는 수술연기의 유해성을 정량적으로 제시하고, 국소배기장치의 명확한 저감 효과를 입증함으로써 의료인의 직업적 노출 위험을 줄이기 위한 기초자료를 제공한다는 점에서 의의가 있다.

V. 결 론

본 연구는 수술연기 내 주요 유해인자의 농도를 정량적으로 제시함으로써 수술과정에서 발생하는 노출 수준을 객관적으로 확인하였다. 또한 국소배기장치의 사용이 유해인자 농도를 효과적으로 감소시키는 결과를 보임에 따라, 국소배기장치가 수술실 내 유해인자 노출 저감을 위한 필수적인 공학적 제어수단임을 확인하였다. 이는 수술실 내 국소배기장치 설치 및 올바른 사용법이 수술실 안전 가이드라인에 반영되어야 하며, 단순 권고 수준을 넘어 향후 의무화 체계로 전환될 수 있도록 제도적·정책적 논의가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 가천대학교 의과대학 의학과 의학연구과정의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Adamiec E, Jarosz-Krzemińska E, Wieszała R. Heavy metals from non-exhaust vehicle emissions in urban and motorway road dusts. *Environ Monit Assess* 2016;188(6):369
- Arfaeina H, Ghaemi M, Jahantigh A, Soleimani F, Hashemi H. Secondhand and thirdhand smoke: a review on chemical contents, exposure routes, and

- protective strategies. *Environ Sci Pollut Res* 2023;30:78017–78029
- Benaim EH, Jaspers I. Surgical smoke and its components, effects, and mitigation: a contemporary review. *Toxicol Sci* 2024;198(2):157–168
- Brüske-Hohlfeld I, Preissler G, Jauch KW, Pitz M, Nowak D, et al. Surgical smoke and ultrafine particles. *J Occup Med Toxicol* 2008;3:31
- Dumas O, Wiley AS, Quinot C, Varraso R, Zock JP, et al. Occupational exposure to disinfectants and asthma control in US nurses. *Eur Respir J* 2017;50(4):1700237
- Ham S, Lee N, Eom I, Lee B, Tsai PJ et al. Comparison of Real Time Nanoparticle Monitoring Instruments in the Workplaces. *Safety and Health at Work* 2016;7(4):381–388
- Lee T, Soo JC, LeBouf RF, Burns D, Schwegler-Berry D, et al. Surgical smoke control with local exhaust ventilation: Experimental study. *J Occup Environ Hyg* 2018;15(4):341–350
- Michaelis M, Hofmann FM, Nienhaus A, Eickmann U. Surgical smoke-hazard perceptions and protective measures in German operating rooms. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17(2):515
- Okoshi K, Kobayashi K, Kinoshita K, Tomizawa Y, Hasegawa S, et al. Health risks associated with exposure to surgical smoke for surgeons and operation room personnel. *Surg Today* 2015;45(8):957–965
- Ulmer BC. The hazards of surgical smoke. *AORN J* 2008;87(4):721–734
- World Health Organization(WHO). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021
- Zhou Y, Wang C, Zhou M, Li Z, Chen D, et al. Surgical smoke: A hidden killer in the operating room. *Asian J Surg* 2023;46(10):3447–3454

<저자정보>

서용혁(학부생), 함승헌(교수)