

병원 수술실에서의 복강경 수술 중 실내공기질 평가

Evaluation of Indoor Air Quality in a Hospital Operating Room During Laparoscopic Surgery

최동희* Choi, Dong Hee | 강동화** Kang, Dong Hwa

Abstract

Purpose: The identification and quantification of indoor airborne contaminants, including bio-aerosols, particulates, and gaseous contaminants, are crucial for maintaining acceptable indoor air quality for hospital operating rooms (ORs). Laparoscopic surgery has become widely accepted for various surgical procedures due to its rapid recovery rate and the low risk associated with small incisions compared to conventional open surgery. The objective of this study is to investigate the indoor air quality in hospital ORs and to identify indoor airborne contaminants generated during laparoscopic surgery. **Methods:** Measurements of an indoor environment, including temperature, humidity and air quality, were performed in an OR before and during a laparoscopic surgery. Indoor airborne contaminants, including volatile organic compounds (VOCs), formaldehyde, carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), sulfur dioxide (SO₂), nitrogen dioxide (NO₂), suspended indoor particles, and airborne bacteria, were measured simultaneously. **Results:** The study determined that the concentrations of indoor air particles and airborne bacteria increased during the surgery but were within acceptable levels. However, the concentration of CO₂ reached a high level of 1,791 ppm due to the CO₂ gas required for maintaining the pneumoperitoneum during the surgery. **Implications:** The results emphasized the use of ventilation and filtration in a laparoscopic surgery room to lower the concentration of filterable and non-filterable contaminants.

주제어: 실내공기질, 병원, 수술실, 복강경 수술, 환기시스템, 수술가스

Keywords: Indoor air quality, Hospital, Operating room, Laparoscopic surgery, Ventilation system, Surgical smoke

1. 서론

병원 수술실에서 적절한 수준의 실내공기질을 유지하기 위해서는 바이오 에어로졸, 입자상 및 가스상 오염물질과 같은 실내 공기부유 오염물질의 식별과 정량화가 필요하다. 수술실에서의 수술가스 등으로 인한 실내공기질 악화는 수술실에서의 교차오염(SSI; Surgical Site Infection)과 수술진의 작업환경 위해도를 상승시키는 결과를 초래할 수도 있다. 수술실 공기질에 대한 인식은 수술실과 환기시스템의 설계와 제어와 직결되는 문제이다. [표 1]과 같이 미국의 NFPA(National Fire Protection

Association), AIA(American Institute of Architects) 등의 기관들은 수술실에서 요구되는 실내환경 및 환기 설계기준을 제시하고 있다. 하지만 수술실에서의 허용되는 공기부유 오염물질에 대한 가이드라인 등은 매우 제한적으로 언급된다. 따라서 청결한 수술실에 필요한 공기오염 기준은 클린룸에 대한 표준이나 의료시설을 대상으로 한 지역적 가이드라인을 참고하여 고려되고 있다.

복강경 수술은 개복수술에 비하여 비교적 새로운 수술 기법이며 다양한 범위의 수술에 광범위하게 적용되고 있다. 복강경 수술은 최소절개 수술법으로, 기존의 개복수술에 비하여 위험도가 낮고 환자의 빠른 회복을 기대할 수 있다는 장점이 있다. 또한 최소절개로 인한 제한적인 출혈로 인하여 수술진이 수술 부위를 명확하게 관찰할 수 있다는 장점을 갖는다. 하지만 복강경 수술 중의 소작 과정은 연소가스를 발생시키고, 이 과정에서

* 정회원, 연구교수, 서울대학교 건설환경종합연구소
(주저자: mejoy1@snu.ac.kr)

** 이사, 교수, 건축학부 건축공학전공, 서울시립대학교
(교신저자: dhkang@uos.ac.kr)

[표 1] 수술실 환기 기준

출처	온도 (°C)	상대습도 (%)	총환기율 (회/h)	외기 도입율(h ⁻¹)
NFPA(2024)	20-23	35	25	5
AIA(2006)	20-23	30-60	15	3
ASHRAE(2017)	20-24	20-60	20	4
FGI(2022)	20-24	20-60	20	4

휘발성유기화합물(VOCs, Volatile Organic Compounds), 일산화탄소(CO) 및 다른 유해한 오염물질을 발생시킬 가능성이 있다. 또한 복강경 수술 중에는 수술부위의 용이한 관찰시야의 확보를 위하여 기복기(insufflator)를 사용하여 이산화탄소를 주입함으로써 복강을 팽창시킨다. 마취가스의 사용 역시 복강경 수술 중의 수술진과 환자의 건강상의 위해와 연관된 실내공기질 이슈이다. 따라서 복강경 수술 중의 실내공기질의 수준은 전통적인 개복수술 시의 실내공기질과는 상이할 것으로 예상된다.

병원 수술실에서의 실내공기 오염물질에 대한 다수의 연구들이 수행된 바 있다. Wan et al.(2011)은 이식수술실, 대장수술실, 정형외과 수술실에서의 실내공기질을 장기 측정하였다. Dascalaki et al.(2008)은 수술실에서의 실내공기질을 측정하여 수술실 공기 중 알데하이드, 방향족화합물(aromatic compound), 휘발성유기화합물 뿐만 아니라 마취가스와 소독제의 존재를 보고하기도 하였다. Pasquarella et al.(2012)는 다양한 수술과정 중에 수술실에서 미생물 모니터링을 실시하였다. 복강경 수술 중의 실내공기질에 집중한 연구도 일부 있었다. Weston et al.(2009)은 복강경수술 중의 수술가스가 수술진에게 해로울 수 있다고 분석하였으며, Choi et al.(2014)은 복강경 수술 중 전기소작기의 작동에 의해 발생하는 수술가스를 20명의 환자의 복강에서 직접 채취하여, 52종의 휘발성 유기화합물, 5종의 발암성 화학물질 및 비발암성 물질 등이 포함되어 있음을 보고하였다. 이러한 연구들은 복강 내 수술가스에 유해한 공기오염물질이 포함되어 있음을 보여주는 증거이지만, 복강 내 수술가스가 수술실에 확산되어 실제 수술진 및 의료진에 미치는 영향은 여전히 명확하지 않다.

따라서 본 연구에서는 복강경 수술이 진행되고 있는 실제 수술실에서의 실내공기 오염물질의 측정을 통해 수술실 공기질을 분석하고자 한다. 이를 위하여 복강경 수술이 진행되는 실제 수술실을 대상으로 수술 전, 중의 실내 온도 및 공기오염물질에 대한 측정을 수행하였다. 휘발성유기화합물(VOCs), 폼알데하이드, 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 이산화황(SO₂), 이산화질소(NO₂), 부유입자(PM1, PM2.5, PM10, TSP), 총부유박테리아(TAB; Total Airborne Bacteria)를 동시에 측정하였다. 본 연구는 복강경 수술이 수술실의 실내공기질에 미치는 영향을 분석하고 이를 통하여 실내공기질 개선을 위한 수술실 계획 및 환기·청정 시스템의 계획에 활용되고자 하였다.

2. 연구방법

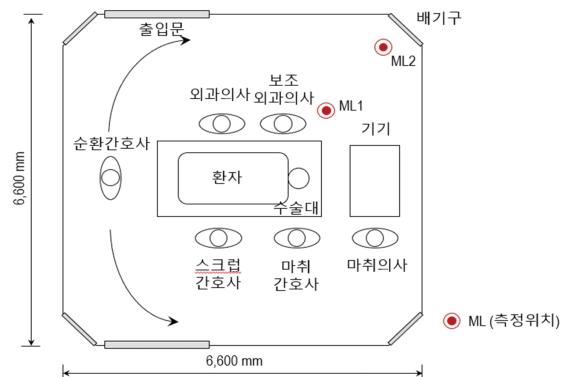
2.1 실험계획

복강경 수술이 진행되는 수술실을 대상으로 수술 전, 중의 실내공기질을 측정하여 비교하였다. 수술 전, 중 측정결과를 비교를 통하여 수술 중에 발생하는 오염물질의 유형에 대한 정보를 제공할 수 있으며, 복강경 수술이 실내공기질에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 모든 측정이 동일한 환경조건에서 수행되었음을 확인하기 위하여 수술실의 공조시스템은 수술 전과 후 모두 동일한 외기도입율, 급배기 풍량, 온도도 조건을 갖도록 설정되었다.

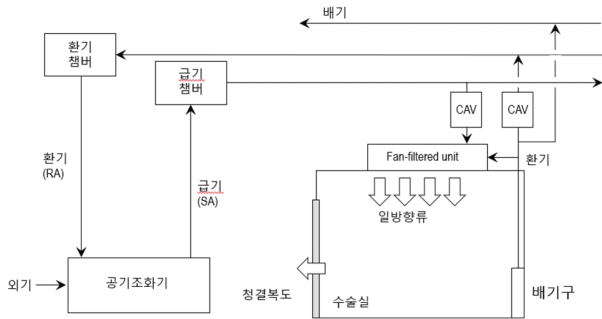
2.2 수술실 및 공조시스템 개요

실내공기질 측정을 위한 대상공간은 칠곡경북대학교 의과대학 센터에 위치한 수술실 1개소를 선택하여 수행되었다. [그림 1]과 [그림 2]는 대상 수술실과 공기조화시스템의 구성을 나타낸 것이다. 본 연구를 위하여 복강경 수술이 예정된 수술실을 선정하여 측정실험을 수행하였다. 수술실은 6.6 m × 6.6 m × 3 m (가로 × 세로 × 높이)의 크기이며, 수술실의 중심에 위치한 수술대, 마취카드, 수술비품들을 위한 여분의 테이블, 내시경 카메라 시스템, 이산화탄소 기복기(insufflator), 전자절삭 및 봉합을 위한 에너지장치 등 수술기구들이 위치하고 있다.

수술실에는 천장매입형 팬필터 유닛(FFU; Fan Filter Unit)이 설치되어 있으며 수술실의 하향취출 일방향류를 생성하였다. 팬필터유닛에 설치된 공기청정필터는 US Federal Standard 209E에 따른 CLASS 100,000 규격에 해당하는 것으로 이는 ISO Class 5(ISO 14644-1)에 해당한다. 수술실에는 실내부의 입자상 및 생물학적 오염물질이 2,920 m³/h의 재순환 공기에 의하여 여과되어 총풍량 4,500 m³/h의 급기량이 제공된다. 수술실의 양압(positive pressure) 유지를 위하여 인접한 청정복도로부터 290 m³/h의 유량이 설정되었다. 환기시스템은 20 회/h의 총환기율과 4 회/h의 외기도입율을 유지할 수 있도록 설계되었으며 이는 ASHRAE와 FGI의 가이드라인을 충족시킨다. 총환기율은 외기도입에 의한 환기율과 재순환공기에 의한 청정급기량을 합산한 것으로 순수 외기도입율과는 구별된다.



[그림 1] 수술실 배치 및 측정 위치



[그림 2] 수술실 공기조화시스템의 구성

2.3 복강경 수술

수술실에서 수행된 복강경수술의 유형은 신세포암종(renal cell carcinoma)을 위한 복강경 근치적 신절제술(radical nephrectomy)이다. 복강경 수술은 이른 아침 시작되어 해당 수술 전에는 다른 수술 등이 이루어지지 않은 빈 수술실의 상태였다. 수술 전의 수술실 공기질 측정은 본 수술 전날 수행되었다. 빈 수술실 측정 시에는 2인의 측정인원을 제외하고는 비재실 상태였다. 복강경 수술 중에는 수술의사, 보조의사, 스크럽간호사, 마취의사, 마취간호사, 순환간호사를 포함하여 6인이 재실하였으며, 환자와 2인의 실험인원도 재실하였다. 오전 7시 30분에 2인의 간호사가 수술실에 들어와 수술기구를 세팅하였으며, 오전 8시에 수술의사와 마취의사가 수술실에 진입하여 환자에게 마취를 시행하였다. 환자를 수술대에 준비시킨 후 수술장비가 완전히 준비되었으며 본격적인 수술이 8시 30분부터 시작되었다. 수술은 CO₂ 기복기(Force FX; PneumoSure; Stryker, Kalamazoo, MI, USA)의 가동을 시작으로 에너지시스템(Covidien, Boulder, CO, USA)의 가동이 시작되었다. 에너지소스는 수술 중의 전기소작기를 위하여만 사용되었다. 수술 중, 수술가스는 CO₂ 기복기와 전기소작기의 작동에 따라 지속적으로 발생되었다. CO₂와 함께 수술가스는 환자 복강에 축적되어 있다가, 의료진이 주기적으로 수술가스를 환자의 복강의 배출구를 통하여 외부로 배출시켰다. CO₂ 기복기와 에너지 소스에 의한 수술가스와 CO₂ 등의 가스생성은 오전 8시 30분에서 11시 30분까지 주로 이루어졌다.

2.4 공기채취 및 분석방법

[표 2]는 공기채취 오염물질과 측정기구를 나타낸다. 수술 전과 수술 중, 수술실에서의 휘발성유기화합물, 폼알데하이드, CO, CO₂, SO₂, NO₂, PM1, PM2.5, PM10, TSP, 총부유박테리아(TAB)를 측정하였다. 측정된 실내공기오염물질들은 복강경 수술 중에 발생하는 휘발성유기화합물 뿐만 아니라 국내 실내공기질 관리법의 의료시설에서 규정하고 있는 쾌적한 실내환경을 유지하기 위하여 권장되는 오염물질 들을 포함하고 있다. 실내 공기오염물질은 수술실의 배기구 근처에서 포집되어 수술실의 전반적인 공기질을 파악하고자 하였다. 하지만 휘발성유기화합물과, 폼알데하이드, 부유박테리아 등은 환자의 복강에서 배출

되는 수술가스에 주로 포함되어 있을 것으로 추정되므로 추가적인 공기포집 위치를 고려하였다. 원래는 환자 복강 상부의 수술가스 열기둥(thermal plume)¹⁾에서 직접적인 측정을 의도하였으나, 수술진과의 상의를 통하여 수술진행에 방해가 되지 않도록 수술진 호흡영역 인근의 포집위치를 선정하였다. 공기포집 위치는 [그림 1]과 같다. 측정 위치(ML1)은 보조의사로부터 수평거리 0.5m 이내에 위치하며, 높이는 1.5m이다. 측정 위치(ML2)는 배기구로부터 0.5m 이내에 위치하며 높이는 0.4m 이다.

[표 2] 오염물질별 측정 장비

오염물질	모델	측정가능범위 및 오차
휘발성유기화합물	MP-Σ30 (SUPELCO, 일본)	풍량범위: 0.05-0.5 L/min (±5%)
폼알데하이드	MP-Σ300 (SUPELCO, 일본)	풍량범위: 0.5-5 L/min (±5%)
미세먼지	DustMate(Turnkey-instrument, UK)	크기범위: 직경 0.5-15µm
O ₃	TG-501 (Graywolf sensing solution, 미국)	측정범위: 0-1.0 ppm
SO ₂		측정범위: 0-50 ppm
NO ₂		측정범위: 0-20 ppm
TAB	MAS 100 eco(Merck, 독일)	Nominal 풍량: 100 L/min (±4%)
CO	TSI 7545 (TSI, 미국)	측정범위: 0-500 ppm (±3%)
CO ₂		측정범위: 0-5000 ppm (±3%)
기온	Center342 (Center, 타이완)	측정범위: -30°C-70°C (±0.7%)
상대습도		측정범위: 5%-98% (±3%)

휘발성유기화합물과 폼알데하이드는 실내공기질공정시험법에 따라 측정되었으며 총 12개(수술전 4개, 수술 중 8개)의 공기 샘플이 저유량 포집펌프(MP-Σ30H; SIBATA, Japan)와 Tenax TA(SUPELCO, Japan)가 충전된 스테인레스 스틸 튜브관에 포집되었다. 휘발성유기화합물의 포집유량은 0.006 m³/h의 유량으로 총 0.003 m³ 이 포집되었다.

3. 연구결과

3.1 실내 온습도

[표 3]은 수술실의 온습도 측정결과를 나타낸다. 수술 전과 수술 중의 온습도는 대체로 동일하였으며, 이는 실내공기질 측정이 동일한 온열환경 조건에서 이루어졌음을 보여주는 것이다. 3시간 동안의 복강경 수술 중의 수술실 평균 온도는 21.1°C로 나타났으며 상대습도는 58.1%였다. 이러한 값은 보통의 수술실에서의 적정 온도(20~24°C)와 상대습도(20~60%)를 제시하고 있는 수술실 설계기준에 잘 부합하는 것이다.

1) 복강 내 전기소작에 의하여 수술가스가 가열됨에 따라 열적부력이 발생하며 이에 의해 형성되는 열기둥(thermal plume)

[표 3] 복강경수술 전과 수술 중의 수술실 열환경 측정 결과

환경인자		수술 전	수술 중
기온 (°C)	평균	21.4	21.1
	표준편차	0.1	0.1
	최소값	21.2	20.8
	최대값	21.7	21.3
상대습도 (%)	평균	60.4	58.1
	표준편차	1.9	1.6
	최소값	55.0	54.4
	최대값	63.3	61.5

3.2 수술 전 수술실의 실내공기질

복강경 수술 전 평균 폼알데하이드 농도는 18 µg/m³, 총휘발성유기화합물 농도는 292.3 µg/m³으로 나타났다([표 4] 참조). 휘발성유기화합물은 일본 실내공기표준혼합물(JP 47537, Supelco, USA)를 사용하여 분석하였으며 표준혼합물 52개 휘발성유기화합물 중 에틸벤젠, 스티렌, 자일렌 농도는 각각 25.3 µg/m³, 5.5 µg/m³, 9.1 µg/m³, 2.1 µg/m³, 41.6 µg/m³으로 나타났다. 폼알데하이드와 휘발성유기화합물의 기준농도가 명확히 제시된 바가 없으므로, 미국 환경청(USEPA)에서 제안한 호흡노출참고치(RfC; Reference Concentration)값을 사용하였다. 호흡노출참고치는 오염물질의 장기노출에 대한 건강상의 위해를 평가한 지표로 널리 활용된다. [표 5]에서 제시된 것과 같이 수술실에서 측정된 농도들은 모두 호흡노출참고치의 제안값 이하로 나타났다.

[표 4] 복강경수술 전과 수술 중의 수술실 휘발성유기화합물 농도 측정 결과

휘발성유기화합물	수술 전 농도 (µg/m³)				수술 중 농도 (µg/m³)				증가율 (-)
	평균	표준편차	최소값	최대값	평균	표준편차	최소값	최대값	
Benzene	5.5	0.6	4.6	5.9	8.2	0.6	7.1	9.0	1.5
1-Butanol	5.6	0.1	5.6	5.7	5.7	2.7	0.1	7.3	1.0
2-Butanone	1.8	1.2	0.1	2.5	2.4	1.3	0.1	3.1	1.3
Chloroform	2.3	1.5	0.1	3.2	5.6	0.5	5.2	6.2	2.4
Decanal	2.8	0.0	2.8	2.8	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0
Dodecane	11.0	7.1	0.4	14.7	18.0	7.7	0.6	22.1	1.6
Ethyl acetate	1.6	0.0	1.6	1.6	1.9	0.2	1.7	2.1	1.2
Ethylbenzene	9.1	0.3	8.8	9.5	7.8	0.7	6.5	8.8	0.9
4-Ethyltoluene	2.0	2.7	0.1	4.0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.A.
Hexadecane	8.6	7.2	0.3	12.9	11.7	0.6	11.0	12.2	1.4
Hexane	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5.9	3.3	3.0	9.5	N.A.
Octane	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.8	0.0	1.8	1.8	N.A.
(-)-α-Pinene	2.0	0.0	2.0	2.0	4.3	0.1	4.2	4.4	2.2
(-)-β-Pinene	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3.9	2.6	0.1	5.8	N.A.
Styrene	2.1	0.0	2.1	2.1	2.9	0.1	2.9	3.0	1.4
Tetradecane	15.1	9.7	0.5	20.6	17.6	7.5	0.6	21.5	1.2
Toluene	19.7	12.8	0.6	26.7	27.4	12.2	0.6	37.2	1.4
Tridecane	5.9	3.8	0.2	8.5	5.8	2.7	0.1	7.6	1.0
1,2,3-Trimethylbenzene	3.7	0.0	3.7	3.7	4.2	0.1	4.1	4.3	1.1
1,2,4-Trimethylbenzene	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.2	3.0	0.1	4.3	N.A.
Undecane	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.7	0.0	2.7	2.7	N.A.
o-Xylene	41.6	7.4	37.2	52.7	10.5	0.1	10.4	10.6	0.3
p-Xylene	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	11.8	2.5	8.7	15.9	N.A.
TVOC (µg m⁻³)	292.3	11.0	273.6	301.4	431.7	25.2	395.1	468.1	1.5

수술 직전 수술실에서의 CO₂ 농도는 619ppm이었으며, CO 농도는 3.6ppm, SO₂ 농도는 0.1 ppm이었다([표 6] 참조). O₃와 NO₂는 검출되지 않았다. TSP, PM1, PM2.5, PM10의 농도는 57.6 µg/m³, 0.1 µg/m³, 0.8 µg/m³, 16.2 µg/m³로 나타났다. 평균 총 부유박테리아 농도는 46 CFU/m³이었다.

3.3 수술 중 수술실의 실내공기질

복강경 수술로 인한 실내 부유 오염물질의 증가를 파악하기 위하여 실내 오염물질 농도의 증가율을 [표 5]와 [표 6]에서 산출하였다. 증가율은 복강경 수술 전과 수술 중의 평균 공기오염물질 농도의 비율로 계산하였다. 따라서 1을 초과하는 증가율은 수술 전에 비하여 수술 중의 오염물질 농도가 증가하였음을 나타내며, 1 미만의 증가율은 수술 전에 비하여 수술 중의 오염물질 농도가 저감되었음을 나타낸다.

[표 5] 수술 중 VOCs 농도 측정결과 및 만성 노출 기준값

VOCs	측정 농도 (µg/m³)	호흡노출참고치 (µg/m³)
Benzene	8	30
Toluene	33	5,000
Ethyl-benzene	8	-
Xylene	15	100
Styrene	3	1,000
TVOC	432	-

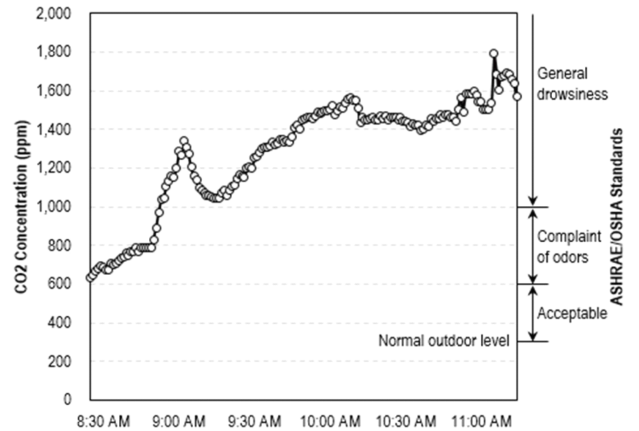
[표 6] 복강경수술 전과 수술 중의 수술실 실내공기질 측정 결과

오염물질	수술 전 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				수술 중 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				증가율 (-)
	평균	표준편차	최소값	최대값	평균	표준편차	최소값	최대값	
CO ₂ (ppm)	619	47	547	699	1,279	287	632	1,791	2.1
CO (ppm)	3.6	0.2	3.3	4.3	2.7	0.3	1.9	3.2	0.8
O ₃ (ppm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
SO ₂ (ppm)	0.1	0.0	0.1	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	2.0
NO ₂ (ppm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
PM ₁ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	0.1	0.0	0.1	0.1	0.6	0.9	0.2	3.8	6.0
PM _{2.5} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	0.8	0.2	0.6	1.2	3.1	4.1	1.1	16.9	3.9
PM ₁₀ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	16.2	5.1	10.9	25.4	28.1	10.2	8.2	66.4	1.7
TSP ($\mu\text{g m}^{-3}$)	57.6	17.9	40.9	94.6	94.2	25.7	25.2	240.9	1.6
TAB (CFU m^{-3})	46.0	6.0	40.0	52.0	116.8	33.2	76.0	180.0	2.5

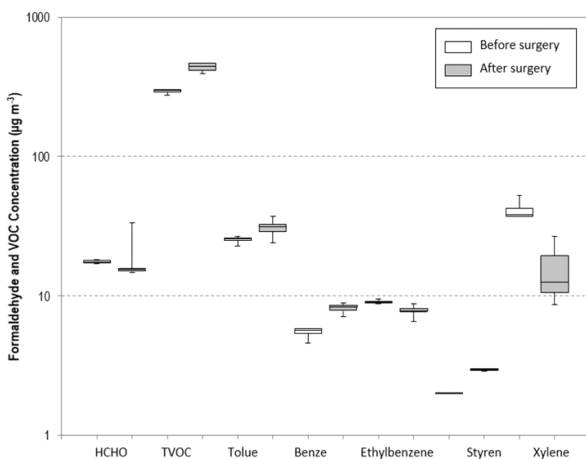
수술 중에는 평균 폼알데하이드 농도가 $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 평균 TVOC 농도는 $431.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. [표 4]와 같이 일본 실내공기표준준합물에 규정된 52개 휘발성유기화합물 중 22개 휘발성유기화합물이 검출되었다. 개별 화합물 중 톨루엔의 평균 농도는 $32.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 벤젠은 $8.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 에틸벤젠은 $8.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 스티렌 $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 자일렌 $15.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 톨루엔, 벤젠, 스티렌, 총휘발성유기화합물은 복강경 수술에 의해서 유의미한 상승이 있었으며, 증가율은 각각 1.3, 1.5, 1.4, 1.5였다. 이러한 오염물질들의 증가는 호흡노출참고치보다는 여전히 낮은 수준이었다. 폼알데하이드와 휘발성유기화합물들의 농도의 변화는 [그림 3]에서 도식화하였다. 에틸벤젠, 자일렌, 폼알데하이드의 농도는 증가하지 않았다.

[그림 4]는 수술 중 CO₂ 농도의 변화를 보여준다. 오전 8시 45분 이전 모든 수술 의료진과 실험자가 수술실에 입실하였으며, CO₂ 농도의 평형이 도달하였다. CO₂ 기복기 가동이 시작된 후 CO₂ 농도가 급격히 상승하였다. 수술 중 최대 CO₂ 농도는 1791 ppm에 달하였으며 수술 말미의 환자 환부 봉합을 위하여 CO₂ 주입이 중지되기 직전까지 상승하였다. CO₂ 농도의 증가율은 2.1이었다. CO, O₃, SO₂를 포함한 다른 가스상 오염물질의 상승은 무시될 수준이었다.

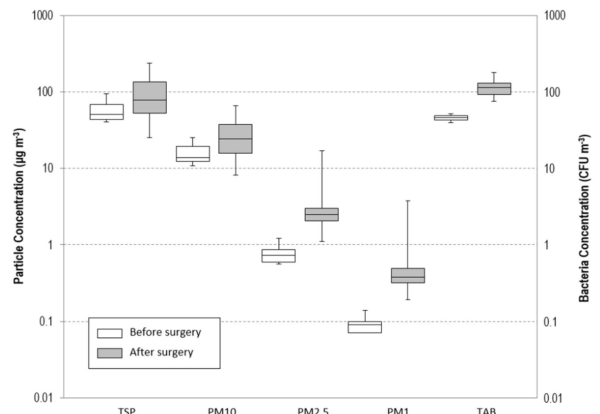
총부유박테리아의 농도는 [표 6]과 같다. 수술로 인하여 총부유박테리아 농도의 현격한 증가가 있었다. 수술 중 총부유박테리아의 평균 및 최대 농도는 $115.8 \text{CFU}/\text{m}^3$, $180 \text{CFU}/\text{m}^3$ 이었으며 증가율은 2.4로 나타났다. 이러한 경향은 실내 입자농도의 변화에서도 나타나는데 [그림 5]와 같다. 수술 중 TSP, PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀의 평균 농도는 $94.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $28.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며 증가율은 1.6, 6.0, 3.9, 1.7로 나타났다.



[그림 4] 복강경수술 중의 CO₂ 시계열 농도



[그림 3] 수술실에서 복강경수술 전과 수술 중의 폼알데하이드와 휘발성유기화합물 농도 비교

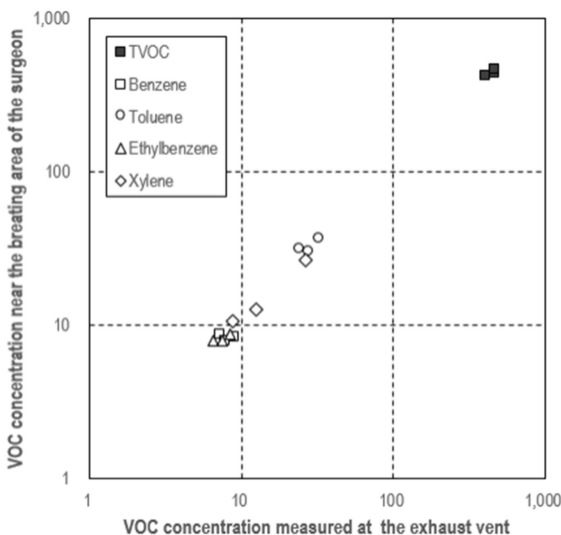


[그림 5] 수술실에서 복강경 수술 전과 수술 중의 미세먼지와 부유박테리아 농도 비교

4. 토의

4.1 복강경 수술이 수술실 공기질에 미치는 영향

수술 환경에서는 다양한 공기오염 위험성이 존재한다. 복강경 수술은 수술실 교차감염의 위험을 줄일 수 있으나 수술 중에 발생하는 수술가스로 인하여 휘발성유기화합물, 미세입자, 부유박테리아 및 관련된 여러 유해 공기오염물질을 발생시킬 수 있다. 여러 연구자들이 복강경 수술 중 복강 내 전자소작기(electrocautery device), 투열기구(diathermy device) 사용 시 유해 수술가스 발생의 위험성을 제기한 바 있다. 본 연구의 결과 수술가스 내 휘발성유기화합물과 폼알데하이드가 검출되었다. 또한 수술가스 기둥(plume)의 연속적 발생으로 인해 수술 중 불쾌한 냄새도 뚜렷히 맡을 수 있었다. Choi et al.(2014)는 테들러 백법을 사용하여 20명의 환자 복강에서 직접 채취한 수술가스에 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 톨루엔과 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 벤젠을 포함한 개별 휘발성유기화합물 농도를 보고하였다. 하지만 본 연구에서 포집한 수술실 실내 휘발성유기화합물 농도에는 호흡노출참고치 기준 이하의 값이 측정되었다. 이러한 사실은 수술가스에 유해물질이 포함되어 있지만 수술실 공조시스템이 실내 휘발성유기화합물 농도를 충분히 희석시킬 수 있을만큼 신선공기를 공급하고 있으며 일방향류 시스템이 수술진의 호흡영역으로부터 오염물질을 효과적으로 제거하고 있음을 의미한다. 또는 수술대 근처에서 포집된 공기샘플이 수술가스 열기둥의 정확한 농도를 나타내지 못한 것이 원인이었을 수도 있다. 배기구와 수술테이블에서 측정된 농도 간의 상관관계를 [그림 6]에서 제시하였으며, 이는 수술대 근처에서 측정된 공기가 이미 주변 공기와 혼합되었을 가능성을 나타낸다. 초기의 의도와 같이 수술가스 열기둥에서 직접 채취하였다더라면, 본 연구에서 측정된 값보다 더 높은 값이 관측되었을 수도 있다. 특히 벤젠의 농도는 본 수술실에서 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며 이값은 호흡노출참고치보다는 낮지만 상당히 근접한 값으로 나타났다.



[그림 6] 수술진 호흡영역과 수술실 배기구에서 측정된 휘발성유기화합물 농도의 상관관계

복강경 수술 중의 또 다른 실내공기질에 대한 우려는 CO_2 이다. 복강팽창을 위하여 주입된 CO_2 는 수술실 실내 CO_2 농도를 상승시켰다. 실제 기복기에서 공급된 CO_2 유량은 1360 리터였으며, 이로 인해 실내 CO_2 농도가 1791ppm 까지 상승되었다. CO_2 농도는 일반적으로 공기오염물질로 여겨지지는 않으며 실내공기질의 간접지표로 활용된다. 1000ppm 이하의 CO_2 농도가 일반적인 실내환경의 적정 가이드라인으로 제시된다. CO_2 수준이 1000ppm을 초과하게 되는 경우에는 실내에 환기가 부족하여 다른 여러 오염물질의 농도가 축적되어 있을 가능성을 의미하는 것이다. 한편 최근의 한 실험연구는 2,500ppm의 CO_2 농도에서 사람들의 의사결정능력을 저하시킬 수 있음을 제시하기도 하였다. 따라서 본 연구에서 관측된 높은 수준의 CO_2 농도는 수 시간 이상 정밀한 수술 도구의 조작이 요구되는 수술진의 의사결정에도 영향을 미칠 가능성을 시사한다. 이러한 높은 CO_2 농도는 부분적으로 수술진 등 수술실의 재실인원의 호흡으로 인한 것이지만, 인당 호흡률이 분당 0.4 liter이고, 기복기에 의해 공급된 CO_2 가 분당 10 liter의 속도로 공급되었음을 고려하면 수술실의 CO_2 농도의 주된 기여는 기복기에 의한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 복강경 수술 중에 기복기의 사용으로 인한 CO_2 배출관리 등에 유의할 필요가 있음을 제시한다.

영국 HTM 2025는 실내 부유박테리아 농도가 빈 수술실에서 35 CFU/ m^3 , 수술 중인 수술실에서 180 CFU/ m^3 을 초과해서는 안된다고 제시하고 있다. Medical Research Council은 부유박테리아 농도와 수술실에서의 감염발생과의 상관관계가 있음을 제시한 바 있다. 수술 중인 수술실에서 측정된 총부유박테리아 농도는 이러한 가이드라인 보다 낮은 것으로 나타났다. 하지만 빈 수술실에서 측정된 총부유박테리아 농도는 제시된 기준값보다 높게 나타났다. 이러한 사실은 빈 수술실에서 공기샘플 측정을 위한 두 명의 측정자가 재실하였던 것이 원인일 수 있다. 수술 중에는 미세먼지의 농도와 부유박테리아 농도 모두 상승하였음을 보여준다. 하지만 이러한 농도 상승은 복강경 수술 자체의 원인 뿐만 아니라 재실 중인 수술진의 활동 또는 존재의 영향이었을 가능성도 함께 고려하여야 한다.

4.2 복강경 수술실의 설계 및 환기·청정 계획

병원에서 냉난방 공기조화시스템의 주요 설계 목표는 청정하고 안전한 환경을 환자와 의료진에게 제공하는 것이다. 적절하게 설계되지 못한 공조시스템은 고위험의 감염위험과 기타 심각한 건강 상의 위험을 초래할 수 있다. 병원 수술실은 충분한 외기도입과 고효율 공기청정시스템 등 사려깊게 계획된 공조시스템의 설계가 요구된다. 앞서 논의한 바와 같이 수술실에 필요한 최소환기량을 제시한 여러 가이드라인들이 존재하며, 최소 외기도입량 3~5 회/h와 총 환기량 15~25 회/h, MERV (Minimum Efficiency Rating Value) 14 등급의 청정수준이 필요함을 제시하였다. 부유박테리아나 미세먼지 등 여과 가능한 오염물질 저감을 위해서는 고효율 필터 등을 활용할 수 있다. 반면 외기도입은 필터로 여과 불가능한 오염물질들, 즉 휘발성유

기화합물, CO₂, CO, O₃, NO₂와 같은 오염물질의 희석에 효과적이다. 본 연구에서의 복강경 수술 중 수술실의 실내공기질 측정 결과, 외기도입과 청정급기를 포함한 총 유량은 다양한 오염물질 제어에 대체로 충분한 것으로 파악되었으나, CO₂, 벤젠 등 복강경 수술에 의한 발생기여가 높은 일부 오염물질 등의 관리를 위해서는 추가적인 연구와 노력이 필요할 것으로 보인다.

이 때에는 수술실의 전반환기 외에 국부적인 배기 시스템이 효과적일 수 있다. 전반환기를 사용할 경우, 오염물질의 희석을 위하여 외기도입을 증가시켜야 하며 이는 공조시스템의 에너지 소비를 증가시킬 우려가 있다. 에너지 절감 등 지속가능한 방식에 대한 고려가 의료시설의 설계에서 강조될 필요가 있다. 수술 가스 효과적인 배출을 위하여 수술실에서 활용가능한 국부배기 환기시스템의 계획 또한 고려할 만 하다. 복강에서 배출된 수술 가스가 수술진의 호흡영역에 도달하지 못하도록 이동형 일방향류 시스템(Mobile laminar flow unit)을 활용한 방안도 생각해 볼 수 있다. 이 경우 수술대 근처에 이동형 시스템이 위치하여야 하므로 수술진의 배치, 수술공간의 확보 등 공간계획에도 일부 영향을 미칠 수 있다. 복강내부로부터 직접 수술가스를 제거할 수 있도록 복강 배기 시스템을 활용하는 것도 대안이 될 수 있다. 하지만 이러한 장비는 사용하기 불편하고 비용이 높으며 수술가스 노출에 대한 건강상의 위험에 대한 지식이 현재로서는 부족하므로 많은 수술실에서 항상 사용되고 있지 않다.

본 연구는 복강경 수술 중의 공기부유 오염물질의 정보 뿐만 아니라 수술실의 실내공기질에 대한 기여도에 대한 정보를 제공하였다는 측면에서 의의가 있다. 한정된 실험사례로 인하여 일반화에는 주의가 필요하지만, 기복기를 활용하며, 전기소작기에 의한 신체 조직의 연소과정이 포함된 복강경 수술의 경우는 본 연구에서 관찰된 공기 중 오염물질에 대하여 지속적인 관심이 필요하다. 복강경 수술의 종류가 다양하고 수술실의 형상이나 설비시스템의 운용의 차이가 있을 수 있으므로 연구결과의 일반화를 위해서는 추가적인 연구가 요구된다. 또한 본 연구에서 관찰된 복강경 수술실의 실내공기질 특성을 고려하여 안전하고 청결한 수술실 계획을 위한 다양한 방안이 추후 평가될 필요가 있다.

5. 결론

본 연구는 복강경 수술이 진행되는 수술실의 실내환경 및 공기질을 측정하고 복강경 수술 중의 실내 공기오염물질을 규명하고자 하였다. 연구의 결과, 복강경 수술 중 발생하는 일부 가스상 오염물질이 잠재적 건강의 위험을 줄 가능성이 있음을 제시하였다. 수술실 내 미세먼지 및 부유박테리아와 같이 여과 가능한 오염물질의 농도는 수술 전에 비하여 수술 중 상승함을 확인하였으나 적정 수준 내에 유지되었다. 하지만 CO₂ 등은 수술 중 기복기 사용에 의한 CO₂ 주입으로 높은 값을 나타내었다. 또한 수술 중 벤젠의 높은 농도 또한 관측되었다. 이러한 결과는 복강경 수술 중 오염물질에 대한 의미있는 정보를 제시하고 있

으며, 복강경 수술이 수술실의 공기질에 미치는 영향을 제시하였다는 것에 의미가 있다. 향후 복강경 수술 중 안전하고 청결한 실내환경을 유지하기 위한 건축적, 설비적 계획방법에 대한 연구들이 진행될 필요가 있다.

참고문헌

- American Institute of Architects. 2006, "Guidelines for design and construction of hospitals and health-care facilities", American Institute of Architects.
- ASHRAE, 2017, "Ventilation of health care facilities", ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2017. Atlanta. GA, USA.
- ASHRAE, 2013, "HVAC Design manual for hospitals and clinics", second edition, ASHRAE Atlanta, GA, USA.
- Balaras, C.A.; Dascalaki, E.; Gaglia, A., 2007, "HVAC and indoor thermal conditions in hospital operating rooms", Building and Environment 39:454-470.
- Choi S.H.; Kwon T.G.; Chung S.K.; Kim T-H., 2014, "Surgical smoke may be a biohazard to surgeons performing laparoscopic surgery", Surgical Endoscopy 28:2374-2380.
- Dascalaki E.G.; Lagoudi A.; Balaras C.A.; Gaglia A.G., 2008, "Air quality in hospital operating rooms", Building and Environment 43:1945-1952.
- Essex-Lopresti, M., 1999, "Operating theatre design", Lancet, 353(9157):1007-10.
- Facility Guidelines Institute, 2022, "Guidelines for design and construction of hospitals", Dallas, Texas. USA.
- Fan J.K.; Chan F.S.; Chu K.M.; 2009, "Surgical smoke", Asian J Surg 32:253-257.
- Holcátová, I.; Benešová, V.; Hartlová, D., 2003, "Comparison of the environment in operating theatres in two hospitals", Indoor and Built Environment, 12:121-124.
- King B.; McCullough J., 2006, "Health hazard evaluation report", NIOSH 2001-0030-3020.
- Kiran R.P.; El-Gazzaz G.H.; Vogel J.D.; Remzi F.H., 2010, "Laparoscopic Approach Significantly Reduces Surgical Site Infections after Colorectal Surgery: Data from National Surgical Quality Improvement Program", Journal of the American College of Surgeons 211(2):232-238.
- Lidwell O.M., 1988, "Air, antibiotics and spsis in replacements joint", J Hosp Infect 11(Suppl.C):18-40.
- ME, 2005, "Indoor Air Quality Management Act", revised version, Ministry of Environment, Korea.
- National Fire Protection Association, 2024, "NFPA 99: Health Care Facilities Code", Quincy, MA. USA.
- NHS Estates, 1994, "Health Technical Memorandum 2025: Ventilation in Healthcare Premises", HMSO London, UK.
- Pankhurst, L.J.; Taylor, J.; Cloutman-Green, E.A.; Hartley, J.C.; Lai, K.M., 2011, "Can clean-room particle counters be used as an infection control tool in hospital operating theatres?", Indoor and Built Environment 21:381-391.

- Pasquarella C; Vitali P.; Saccani E.; Manotti P.; Boccuni C.; Ugolotti M.; Signorelli C.; Mariotti F.; Sansebastiano G.E.; Albertini R., 2012, "Microbial air monitoring in operating theatres: experience at the University Hospital of Parma", *Journal of Hospital Infection* 81:50-57.
- Richards C.; Edwards J.; Culver D.; Emori T.G.; Tolson J.; Gaynes R., 2003, "Does Using a Laparoscopic Approach to Cholecystectomy Decrease the Risk of Surgical Site Infection", *Annals of Surgery* 237(3):358-362.
- Satish U.; Mendell M.J.; Shekhar K.; Hotchi T.; Sullivan D.; Streufert S.; Fisk W.J., 2012, "Is CO2 an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO2 concentrations on human decision-making performance", *Environ Health Perspect* 120(12):1671-1677.
- Wan, G-H.; Chung, F-F; Tang C-S., 2011, "Long-term surveillance of air quality in medical center operating rooms", *American Journal of Infection Control* 39:302-308.
- Watson, D.S., 2010, "Surgical smoke evacuation during laparoscopic surgery", *AORN Journal* 92:347-350.
- Weston R.; Stephenson R.N.; Kutarski P.W.; Parr N.J., 2009, "Chemical composition of gases surgeons are exposed to during endoscopic urological resections", *Urology* 74(5):1152-1154.
- Woloszyn, M.; Virgone, J.; Mélen, S. 2004, "Diagonal air-distribution system for operating rooms: experiment and modeling", *Building and Environment* 39:1171-1178.



접수 : 2024년 8월 13일
 1차 심사완료 : 2024년 8월 26일
 게재확정일자 : 2024년 8월 26일
 3인 익명 심사 필

www.kci.go.kr