지구 기후변화와 마취통증의학과 의사의 역할

김 재 환

고려대학교 의과대학 마취통증의학교실

Global climate change and the role of anesthesiologist

Jae Hwan Kim, MD

Department of Anesthesiology and Pain Medicine, Korea University College of Medicine, Seoul, Korea

Background: Environmental issues and health problems related to global climate change are becoming increasingly serious. An effective eco-friendly strategy is required to reduce medical waste and greenhouse gas emissions caused by anesthesia in hospitals.

Current Concepts: Inhalation anesthetics are very strong greenhouse gases in the order of desflurane, isoflurane, nitrous oxide, and sevoflurane. Anesthetics with high global warming potential and long atmospheric lifetimes should be used with caution. Only the minimum required dose of an anesthetic drug with a low persistence bioaccumulation toxicity index is recommended for use. Disposable anesthesia products are known to have a low purchase price and low risk of cross-contamination; however, this may not be the case. By using eco-friendly anesthetic supplies, recycling and reuse, we can avoid wasting money and resources.

Discussion and Conclusion: Greenhouse gas emissions from the use of anesthetics are excluded from United Nations regulations due to their necessity. However, while guaranteeing patient safety, anesthesiologists must fulfill their professional ethical obligations by striving to reduce medical waste and greenhouse gas emissions.

Key Words: Climate change; Medical wastes; Greenhouse gases; Anesthesia

서론

최근 지구 기후변화에 따른 위기는 세계보건에 중대한 위협으로 대두하고 있다. 인위적인 온실가스 배출로 인하여 지구의 온도는 산업 혁명 이후 가장 빠르게 상승하고 있으며,

기후변화와 관련된 각종 환경 및 건강 문제는 점점 더 심화되고 있는 실정이다. 이러한 위협에 대비하기 위하여 국제연합은 협약을 체결하여 각국의 온실가스 배출량을 단계적으로 감축하게 하는 등 경각심을 갖고 노력하고 있지만, 다른 온실가스와 달리 마취제는 그 필요성으로 인해 국제 규제에서 제외되고 있다[1]. 따라서 기후변화에 대한 병원 폐기물과 온실가스 배출에 대한 경각심은 그리 높지 않으며, 의료인들에게 잘 알려지지 않은 듯하다. 그러나 병원에서는 각종 폐기물이 대량으로 발생하고 있으며, 각종 마취제 및 마취 관련 소모품은 그 사용방법에 따라 환경에 해로운 영향을 많이 미칠 수 있다.

미국의 자료에 의하면 온실가스 배출량의 10%가 의료 산

Received: August 11, 2021 Accepted: December 3, 2021

Corresponding author: Jae Hwan Kim
E-mail: anejhkim@korea.ac.kr

© Korean Medical Association

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 use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1. Relative characteristics of inhalational anesthetics

Characteristics	Desflurane	Isoflurane	Sevoflurane	Nitrous oxide
MAC	6.7	1.2	2.2	105
Metabolism (%)	0.02	0.2	4	0.005
GWP100	2,540	510	130	265
Atmospheric lifetime (yr)	14	3.2	1.1	114

Based on the information from [2,4,5].

MAC, minimum alveolar concentration; GWP100, 100-year global warming potential.

업에서 발생하는데, 이 중 1/3 이상이 병원에서 배출된다고 한다[2]. 수술실과 분만실은 병원 총 폐기물의 50% 이상을 발생시키는데[3], 마취행위는 병원 온실가스 전체 배출량의 5%를 차지하는 것으로 추정된다[2]. 따라서 수술실에서 근무하는 마취통증의학과 의사는 본인의 행위가 환경에 미치는 영향에 대하여 잘 알고 있어야 하며, 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위해 노력하는 것은 전문 지식인에게 요구되는 기본적인 윤리적 의무라고 하겠다. 이 논문에서는 마취행위에 따른 환경 문제 발생에 대한 여러 요인들을 알아보고 의료 폐기물과 온실가스 배출을 줄이기 위한 효과적인 친환경적인 방법을 검토해 보고자 한다.

흡입마취제와 온실가스 효과

흡입마취제는 온실가스로 작용한다. 온실가스가 특정 기간 동안 지구온난화에 미치는 영향은 지구온난화잠재력(global warming potential, GWP)으로 측정하는데 이산화탄소의 100년간 지구온난화잠재력(GWP100)인 1을 기준으로 할 때, 흔히 사용되는 흡입마취제인 데스플루레인(desflurane)은 2,540, 아이소플루레인(isoflurane)은 510, 세보플루레인(sevoflurane)은 130, 아산화질소는 265로 GWP가 매우 높음을 알 수 있다(Table 1) [2,4,5]. 이와 같이 마취는 수술 환자 치료에 필수적인 요소이지만, 흡입마취제는 매우 강력한 온실가스로 작용하는데 그 정도는 데스플루레인, 아이소플루레인, 아산화질소, 세보플루레인 순이다.

흡입마취제는 인체 내에서 대사가 거의 되지 않은 상태에서 체외로 배출된다. 각 흡입마취제의 대사율은 데스플루레인 0.02%, 아이소플루레인 0.2%, 세보플루레인 4%, 아

산화질소 0.005%이다(Table 1) [2,4,5]. 체외로 배출된 흡입마취제는 대기로 방출되어 머물게 되는데, 각 흡입마취제의 대기 내에서 파괴되기까지 걸리는 대기 내 잔존기간은 데스플루레인 14년, 아이소플루레인 3.2년, 세보플루레인 1.1년, 아산화질소 114년으로, 매우 오랜 기간 동안 흡입마취제가 온실가스로서 지구 대기에 영향을 미치게 된다(Table 1) [2,4,5].

수술실과 분만실 등에서 환자에게 사용된 흡입마취제는 거의 대사가 되지 않은 상태로 체외로 배출되며, 배출된 흡입마취제는 병원의 가스배출시스템을 통해서 대기로 방출된다. 따라서 흡입마취제로 인한 지구 기후변화에 따른 피해를 최소화하기 위해서는 GWP가 높은 마취제와 대기 잔존기간이 긴 마취제의 사용은 피하는 것이 좋다. 그러므로 GWP가 높고 대기 잔존기간이 긴 데스플루레인과 아산화질소의 사용 시에는 특별한 적응증을 가진 환자에게 사용하는 등 신중을 기울여야 할 것이다.

흡입마취제 사용 시 신선가스유량을 증가시키면 증가시킬수록 기화되는 흡입마취제의 양이 증가하므로 가능한 한 적은 신선가스유량을 사용하는 것이 좋다. 그런데 세보플루레인의 경우 분당 2 L 이하의 신선가스유량을 사용하면 NaCl과 KCl 성분의 이산화탄소 흡착제를 사용할 경우 신독성을 가진 compound A의 발생을 초래할 수 있으므로, Ca(OH)₂ 성분을 가진 이산화탄소 흡착제인 소다라임을 사용하는 것이 추천된다[6,7]. 흡입마취제의 사용을 최소화하기 위해서는 신선가스유량을 분당 1 L 이하로 사용하는 것이 좋지만 치명적인 저산소증이 발생할 수 있으므로, 이때는 반드시 흡입 산소분압과 산소포화도를 철저히 감시해야 한다[8,9]. 전신마취기와 호흡회로에서 새는 곳이 없는지 감시하여 예기치 못한 흡입마취제의 유출을 막아야 하며, 기관 내 삽관 시에는 흡입마취제의 유출을 막기 위해서 신선가스 사용을 잠시 중단하는 것이 좋고, 마취 종료 시에는 흡입마취제의 사용을 중지한 후에 신선가스유량을 높여야 한다.

현재 환자의 호흡회로에서 배출된 흡입마취제는 대부분의 경우 별도의 재처리 과정 없이 병원의 가스배출시스템

Table 2. PBT index of anesthetic drugs

Drug	P	B	T	PBT
Propofol	3	3	3	9
Fentanyl	3	3	2	8
Ondansetron	3	0	3	6
Midazolam	3	0	2	5
Bupivacaine	3	0	2	5
Ropivacaine	3	0	1	4
Granisetron	3	0	1	4
Ketorolac	3	0	1	4
Remifentanyl	3	0	1	4
Flumazenil	3	0	1	4
Sugammadex	3	0	1	4
Lidocaine	3	0	0	3
Atracurium	0	0	2	2
Cisatracurium	0	0	2	2

Based on the information from [14,15].

PBT, persistence bioaccumulation toxicity; P, persistence; B, bioaccumulation; T, toxicity.

을 통해서 대기로 직접 방출되고 있는 실정이다. 이러한 방법은 수술실에 근무하는 의료종사자들에게는 직접적인 흡입마취제 노출에 의한 피해를 줄여줄 수는 있겠으나, 지구 전체 환경에 미치는 피해는 그대로 남게 된다. 따라서 배출된 흡입마취제를 채집하여 재사용하거나 분해하여 제거한 후 대기로 방출시키는 재처리시스템이 요구된다. 할로겐화 유기화합물인 데스플루레인, 아이소플루레인 및 세보플루레인은 안정적인 분자구조를 가져 쉽게 분해되지 않으므로 배출된 마취제를 재사용하는 방법이, 배출된 아산화질소의 경우 분해하여 제거하는 방법의 재처리시스템이 개발되고 있으나, 아직은 개발의 초기 상태로 산업체의 노력과 정부의 지원이 요구된다[10,11]. 이외에도 흡입마취제가 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 흡입마취제 대신 정맥마취제를 사용하거나 국소마취제를 이용한 부위마취를 실시할 수 있다.

마취약제와 환경오염

환자에게 투여된 약제는 체내에서 대사되거나 대사산물로 분해되어 체외로 배출되어 자연 환경 속으로 들어가게 된다. 실제로 병원에서 사용된 많은 약제들이 병원의 폐수에서 발

견되고 있는데 폐수 처리 과정이 그 약물을 완전히 무해하게 대사시켜 처리하는 과정은 아니다[12]. 병원의 폐수로 배출된 많은 약제들은 내분비 교란 물질, 신경 발달 독성 물질, 기형 유발 물질, 돌연변이 유발 물질 및 발암 물질로 작용하는 것으로 알려져 있다[13].

경구, 국소 혹은 정맥으로 투여된 약제가 환자 몸 속의 대사과정을 거쳐 대사산물로 배설되거나, 사용되지 않고 남은 약제 혹은 사용된 후 주사기에 잔류한 약제가 직접 자연 환경 속으로 배출되면 환경오염을 초래하게 된다. 이러한 약제의 환경에 대한 위험도는 세 가지 지표를 선택하여 각각 0-3점으로 정량화한 후 종합적으로 더하여 0-9점으로 측정하게 된다. 이때 사용되는 세 가지 지표로는 약제가 환경에서 분해되지 않고 지속하는 정도(persistence), 생물의 지방 조직에 축적되는 정도(bioaccumulation), 그리고 생물에 독성을 끼치는 정도(toxicity)를 사용하며, 최종 위험도는 이 세 가지 지표의 점수를 종합한 persistence bioaccumulation toxicity (PBT) 지수로 판단한다[14].

정맥마취제와 같은 마취약제를 사용할 때는 가능하면 환자에게 PBT 지수가 낮은 약제를 사용하는 것이 환경 보호에 중요하네, 현재 임상에서 많이 사용되고 있는 프로포폴(propofol)은 마취약제 중에서 PBT 지수가 가장 높은 약제이다(Table 2) [14,15]. 따라서 다른 약제도 마찬가지로지만, 프로포폴을 사용할 때에는 무엇보다도 환경오염의 위험도에 대한 고려를 많이 해야만 한다. 프로포폴은 병원 폐수에서 발견되기도 하는데 물속에서는 대사가 되지 않으므로, 사용 후 남은 프로포폴은 소각 처리할 것이 권유되고 있다[13]. 그러므로 마취약제, 특히 정맥마취제를 사용할 때에는 남은 용량을 최소화하기 위하여 작은 용기에 담긴 약제를 사용하고, 용기에 담긴 약제를 주사기로 추출하여 사용하기 보다는 주사기에 미리 담긴 상태로 제조된 약제를 사용하는 것이 좋다.

이와 같이 정맥마취제가 흡입마취제나 다른 마취 방법들에 비해 환경에 미치는 해로운 영향이 무조건 적은 것은 아니며, 그 사용방법에 따라 환경오염 위험도의 정도가 달라진다. 따라서 마취약제를 사용할 때에는 필요한 최소 용량만을 사용하여, 약제 사용으로 인한 환경오염을 최소화하기 위한

노력이 요구된다.

일회용품과 재사용 가능용품

안면마스크, 기도유지기, 후두경 손잡이 및 날, 기관튜브, 후두마스크 기도유지기, 호흡회로, 호흡낭 및 각종 환자 감시장치 등 많은 종류의 용품이 환자의 마취에 사용되는데, 이러한 마취용품은 일회용 또는 재사용이 가능한 형태로 제공되고 있다. 전통적으로 마취용품을 선택할 때에 환자의 안전, 감염 가능성, 효능, 사용의 용이성 및 비용 등은 중요한 사항으로 고려되었으나 환경에 대한 영향은 크게 중요하게 생각되지 않았다. 그러나 일회용품 및 재사용 가능용품 모두 사용방법에 따라 환경에 많은 영향을 끼칠 수 있다.

일회용품은 구입단가가 싸고 유지관리비용이 적기 때문에 재사용 가능용품에 비해서 총 비용이 적게 든다고 알려져 있는데 실제로 그렇지 않을 수도 있다. 후두마스크 기도유지기 등의 경우 재사용 가능용품은 총 40회에 걸쳐 다시 사용할 수 있는데 20회 이상만 재사용하면 일회용품 20개 사용의 총 비용보다 적어진다고 한다[16]. 또한 재사용 가능 후두마스크 기도유지기는 인체에 비교적 무해한 실리콘 재질인 반면, 일회용 후두마스크 기도유지기는 인체에 해로운 영향을 미칠 수 있는 polyvinyl chloride (PVC) 플라스틱과 diethylhexyl phthalate 재질로 구성되어 있어, 사용 후 자연 환경에 배출되었을 때 일회용 후두마스크 기도유지기가 환경에 해로운 영향을 훨씬 많이 미치게 된다[16].

후두경의 경우 전통적으로 많이 사용되던 금속 재질에 비해 PVC 재질의 일회용품이 환자 간의 교차 오염과 감염의 위험성을 줄이고 비용이 적게 드는 것으로 알려져 있다. 그러나 일회용 후두경 플라스틱 손잡이에 함유된 PVC로 인해 건강상의 위험을 초래할 뿐만 아니라 금속 재질의 후두경에 비해 생산 및 사용 후 폐기 처리에 있어 16-18배 더 많은 온실가스를 배출하는 것으로 알려져 있다[17]. 또한 금속 재질의 후두경은 관리 및 멸균 소독 비용에도 불구하고 5-7번의 재사용만으로도 일회용 후두경보다 총 비용이 적게 들어 결과적으로 비용 및 환경 보호 측면에서 더 효과적이라고 한

다[17].

현재 일회용 마취용품의 경우 구입단가가 싸고, 환자 간의 교차 오염 위험성이 적기 때문에 점점 더 많이 사용되고 있는 실정이다. 그러나 일회용품은 대량으로 제조하는 과정에서 많은 양의 이산화탄소를 발생시키며, 일회용품 사용 후 폐기하는 과정에서 매립지와 소각로에서 독성 물질이 대기 중으로 방출되는 등 상당한 환경 피해를 유발한다. 반면에 재사용 가능용품은 제조 및 폐기 과정에서 발생하는 환경에 대한 영향은 일회용품에 비해 적으나, 재사용을 위해 소독하고 세척하는 과정에서 환경에 유해한 물질을 배출시킬 수 있다. 따라서 마취용품의 선택은 환경에 대한 영향을 고려하여 선택하고, 그 사용량은 필요한 최소한의 적정 수준으로 유지하는 것이 필요하겠다.

수술실과 폐기물 발생

수술실에서는 환자 수술과 마취관리에 사용되는 각종 기구 및 장비를 포장하는 플라스틱, 비닐, 금속 및 종이 등의 폐기물이 대량 발생한다. 이러한 폐기물의 80%는 환자가 수술을 받기 이전인 준비과정에서 발생한다[8]. 수술 및 마취와 관련된 각종 용품, 특히 일회용품의 경우 제조업체와 협력하여 더욱 친환경적인 재료를 사용하게 하고 각종 장비의 포장을 줄이면 병원 폐기물을 감소시켜 환경을 보호할 뿐만 아니라 자원의 낭비를 막을 수 있게 된다.

적절한 폐기물 분리의 중요성은 환경 보호와 폐기물 처리와 관련된 비용을 고려할 때 더욱 명백해진다. 특히 수술실에서는 각종 감염성 폐기물뿐만 아니라 비감염성 폐기물도 대량 발생하므로 수술실에서 발생한 폐기물을 분리하여 수거하는 것은 그 무엇보다도 중요하다. 분리 수거된 감염성 폐기물은 매립하거나 소각하며, 비감염성 폐기물은 재사용하거나 재활용할 수 있다. 수술실의 각종 폐기물 분리를 적절히 하여 종이, 판지, 금속물 등을 40% 재활용하게 되어 폐기물 처리 비용을 절약하고 물품 구매 비용을 절약했다는 보고가 있다[8,18,19].

현재 전 세계가 코로나 19로 인하여 많은 고통을 겪고 있

는데, 코로나19 환자의 마취 시 감염 관리가 무엇보다 중요한 문제로 대두되고 있다[20]. 그런데 이런 코로나19 환자 마취 상황에서도 개인보호장비 사용량과 각종 폐기물 발생을 안전하게 줄여가며 환경을 보호하는 방법을 생각할 수 있다[21].

결론

환자의 안전한 마취관리는 그 무엇보다도 중요하다. 이로 인해 마취제 사용에 따른 온실가스 발생은 그 필요성으로 인해 국제연합 국제 규제에서도 제외되고 있다. 그러나 환자의 마취관리에는 많은 폐기물이 발생하고, 사용하는 마취약제와 방법에 따른 온실가스의 발생과 유해물 배출은 지구 환경에 많은 영향을 미치게 된다.

지구 기후변화와 관련된 각종 문제는 더욱 심화되고 있으며, 국제사회는 온실가스 배출을 줄이기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 따라서 환자의 안전이 보장되는 한, 마취통증의학과 의사는 의료 폐기물과 온실가스 배출을 줄이기 위하여 노력함으로써 지구 환경 보전에 이바지하는 전문의로서 윤리적 의무를 다할 수 있을 것이다.

찾아보기말: 기후변화; 의료폐기물; 온실가스; 마취

ORCID

Jae Hwan Kim, <https://orcid.org/0000-0002-1360-1708>

Conflict of Interest

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

References

- Charlesworth M, Swinton F. Anaesthetic gases, climate change, and sustainable practice. *Lancet Planet Health* 2017;1:e216-e217.
- Practice Greenhealth. Anesthetic gas how-to guide: a guide to climate-smart anesthesia care [Internet]. Reston: Practice Greenhealth; 2019 [cited 2021 Aug 10]. Available from: https://practicegreenhealth.org/sites/default/files/2019-04/anesthetic_gas_how-to.pdf.
- Guetter CR, Williams BJ, Slama E, Arrington A, Henry MC, Moller MG, Tuttle-Newhall JE, Stein S, Crandall M. Greening the operating room. *Am J Surg* 2018;216:683-688.
- Sulbaek Andersen MP, Sander SP, Nielsen OJ, Wagner DS, Sanford TJ Jr, Wallington TJ. Inhalation anaesthetics and climate change. *Br J Anaesth* 2010;105:760-766.
- Hu X, Tom Pierce JM, Taylor T, Morrissey K. The carbon footprint of general anaesthetics: a case study in the UK. *Resour Conserv Recycl* 2021;167:105411.
- Saidman LJ, Eger EI. Safety of low-flow sevoflurane anesthesia in patients with chronically impaired renal function is not proven. *Anesthesiology* 2003;99:752.
- Kharasch ED, Conzen P, Michalowski P, Weiss BM, Rooke A, Artru A, Ebert T, Czerner SFA, Reichle FM. Safety of low-flow sevoflurane anesthesia in patients with chronically impaired renal function is not proven: in reply. *Anesthesiology* 2003;99:752-754.
- Van Norman GA, Jackson S. The anesthesiologist and global climate change: an ethical obligation to act. *Curr Opin Anaesthesiol* 2020;33:577-583.
- Yeoh CB, Lee KJ, Coric V, Tollinche LE. Simple green changes for anesthesia practices to make a difference. *EC Clin Med Case Rep* 2020;3:1-6.
- Sherman JD, Barrick B. Total intravenous anesthetic versus inhaled anesthetic: pick your poison. *Anesth Analg* 2019;128:13-15.
- Ang TN, Baroutian S, Young BR, Hyland MM, Taylor M, Burrell R. Adsorptive separation of volatile anaesthetics: a review of current developments. *Sep Purif Tech* 2019;211:491-503.
- Escher BI, Baumgartner R, Koller M, Treyer K, Lienert J, McArdell CS. Environmental toxicology and risk assessment of pharmaceuticals from hospital wastewater. *Water Res* 2011;45:75-92.
- Sherman J, McGain F. Environmental sustainability in anesthesia pollution prevention and patient safety. *Adv Anesth* 2016;34:47-61.
- Stockholm County Council. Environmentally classified pharmaceuticals 2014-2015 [Internet]. Stockholm: Stockholm County Council; 2015 [cited 2021 Aug 10]. Available from: <https://noharm-global.org/documents/environmentally-classified-pharmaceuticals-2014-2015>.
- Axelrod D, Bell C, Feldman J, Hopf H, Huncke TK, Paulsen W, Stanton C, Ryan S, Rothman B, Sherman J, Striker AB, Szocik J, Torrillo T, Yost S. Greening the operating room. Greening the operating room and perioperative arena: environmental sustainability for anesthesia practice [Internet]. Schaumburg: American Society of Anesthesiologists; 2014 [cited 2021 Aug 10]. Available from: <https://www.asahq.org/>

- about-asa/governance-and-committees/asa-committees/committee-on-equipment-and-facilities/environmental-sustainability/greening-the-operating-room.
16. Eckelman M, Mosher M, Gonzalez A, Sherman J. Comparative life cycle assessment of disposable and reusable laryngeal mask airways. *Anesth Analg* 2012;114:1067-1072.
17. Sherman JD, Raibley LA 4th, Eckelman MJ. Life cycle assessment and costing methods for device procurement: comparing reusable and single-use disposable laryngoscopes. *Anesth Analg* 2018;127:434-443.
18. Sherman JD, Ryan S. Ecological responsibility in anesthesia practice. *Int Anesthesiol Clin* 2010;48:139-151.
19. Kagoma YK, Stall N, Rubinstein E, Naudie D. People, planet and profits: the case for greening operating rooms. *CMAJ* 2012;184:1905-1911.
20. Oh J, Kim E, Kim H, Lee SA, Lee KH, Yu MH, An J. Infection control of operating room and anesthesia for cesarean section during the COVID-19 outbreak in Daegu, the Republic of Korea -a case series. *Korean J Anesthesiol* 2021;74:169-174.
21. McGain F, Muret J, Lawson C, Sherman JD. Effects of the COVID-19 pandemic on environmental sustainability in anaesthesia. Response to *Br J Anaesth* 2021;126:e118-e119. *Br J Anaesth* 2021;126:e119-e122.