www.kjcdh.org

Korean Journal of Clinical Dental Hygiene

Original Article

플루오레세인 형광 가시화 기법과 ImageJ를 이용한 술자 및 치아 위치별 스케일링 에어로졸 침착분포 면적 분석

이나영, 김한나*
연세대학교 보건과학대학 치위생학과

Quantifying Scaling Aerosol Distribution Using ImageJ and Fluorescein Visualization: Effects of Operator and Tooth Location

Received: March 09, 2026
Revised: March 30, 2026
Accepted: March 31, 2026

Na-Young Lee, Han-Na Kim*
Department of Dental Hygiene, College of Health Sciences, Yonsei University, Wonju, 26493, Republic of Korea

*Corresponding Author: 김한나, (26493) 강원특별자치도 원주시 연세대길 1, 연세대학교 보건과학대학 치위생학과, Tel: (033) 760-5561, Fax: (033) 760-5575, E-mail: hannakim@yonsei.ac.kr

Abstract

Objective: To quantify aerosol distribution patterns during ultrasonic scaling using a fluorescein visualization technique and ImageJ, and to identify high-risk conditions and establish evidence-based infection control protocols by analyzing contamination areas based on operator position and target tooth site. **Methods:** A 1.0% sodium fluorescein solution was used as a coolant during scaling on a manikin. Variables included operator positions(7, 10:30, and 12 o'clock) and tooth areas. Images of aerosols visualized under ultraviolet light were captured and quantitatively analyzed for area ratios(%) using ImageJ software. **Results:** Aerosol distribution varied significantly by operator position. The 12 o'clock position during anterior scaling had the highest contamination(17.17±3.00% vertical; 13.18±1.30% horizontal), with fan-shaped diffusion towards the face and chest of the operator. Conversely, the 10:30 position had the lowest contamination(0.42±0.39% vertical) due to the shielding effect of the buccal mucosa. Vertical imaging consistently had higher contamination ratios than horizontal imaging at all positions. **Conclusions:** The spread of invisible aerosols were objectively quantified using fluorescence visualization. The findings highlight that the 12 o'clock position is highly vulnerable to contamination, providing critical data for optimizing operator positioning, personal protective equipment guidelines, and clinical infection control strategies.

Key words: Dental aerosol, Fluorescein, ImageJ, Infection control, Operator position, Ultrasonic scaling

색 인: 치과에어로졸, 플루오레세인, 이미지제이, 치과감염관리, 술자위치, 치과스케일러

Copyright © 2026 by Korean Journal of Clinical Dental Hygiene. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

1. 서론

현대 치과 진료 환경에서 초음파 스케일러, 고속 핸드피스 등 공압 및 진동 기구의 사용은 불가피하며, 이 과정에서 에어로졸과 비말이 다량 발생한다(1, 2). 에어로졸은 입자 크기가 작아 공기 중에 수 시간 동안 부유하며 진료실 전체로 확산될 수 있고(3), 비말은 환자의 타액, 혈액, 그리고 구강 내 미생물을 직접적으로 전파하는 매개체가 된다(4, 5). 특히 최근 전 세계적인 팬데믹 사태를 거치며 치과 종사자와 환자 간의 교차 감염에 대한 경각심이 고조됨에 따라, 진료실 내 에어로졸 발생 패턴 파악과 효과적인 통제 전략 수립은 감염 관리의 핵심 과제로 부각되고 있다.

그러나 에어로졸은 육안으로 식별하기 어려운 미세 입자로 구성되어 있으며 확산 속도가 매우 빨라, 임상 현장에서는 오염의 실제 범위와 잠재적 위험성을 과소평가하는 경향이 있다. 그동안 에어로졸의 측정을 위해 미생물 배양법이나 공기샘플링, 면봉채취법을 이용한 분석이 주로 시행되어 왔으나(6-8), 이러한 방식은 미생물의 생존율에 영향을 받거나 배양가능한 박테리아만 검출한다는 점, 그리고 에어로졸의 확산 면적을 수치화하기 어렵다는 한계가 있었다. 최근 일부 연구에서 레이저/광학 연구로 레이저시트를 사용하여 에어로졸을 가시화하여 움직임을 관찰하고자 하였으나(9) 사용되는 장비가 고가로 실용적으로 적용하기에는 어려움이 있다. 추가적으로 플루오레세인 형광 염료를 활용한 시각화 시도가 이루어지고 있으나(10, 11), 술자의 작업 위치나 상·하악 및 전·구치부 등 대상 치아 부위와 같은 구체적인 임상 변수가 분포 면적에 미치는 영향을 디지털 이미지 분석 소프트웨어를 통해 정량적으로 입증한 사례는 여전히 부족한 실정이다.

에어로졸 오염의 가장 큰 원인으로 간주되는 장비는 초음파 스케일러이다(12). 따라서 스케일링 시 발생하는 에어로졸의 구체적인 분포 패턴을 파악하는 것은 단순히 오염 범위를 확인하는 것을 넘어, 임상 현장에 실질적으로 적용 가능한 근거기반 감염관리 프로토콜 수립의 기초가 된다. 특히, 시술부위나 술자의 자세 등 다양한 변수에 따른 데이터를 정량화함으로써 개인보호구의 적정수준 및 표면 소독의 우선순위 결정 등의 객관적인 치과 감염관리 전략을 수립하는데 중요한 의의가 있다.

이에 본 연구는 플루오레세인 형광 가시화 기법과 디지털 이미지 분석 도구인 ImageJ (National Institutes of Health, USA)를 결합하여, 치과 스케일링 시 발생하는 에어로졸의 확산 범위를 정량적으로 측정하고자 한다(11). 특히 술자의 작업 위치와 환자의 치아 부위에 따른 오염 면적의 차이를 통계적으로 분석함으로써, 감염 노출 위험이 극대화되는 특정 조건을 규명하고자 한다. 본 연구의 결과는 임상 현장에서 술자의 위치 선정 및 개인 보호구 착용 지침을 정교화하고, 진료실 구조에 최적화된 감염 관리 프로토콜을 수립하는 데 과학적 근거 자료를 제공할 것으로 기대된다.

2. 연구대상 및 방법

2.1. 실험 재료 및 환경 설정

본 실험은 스케일링 시 발생하는 에어로졸의 분포 패턴을 분석하기 위해 충청북도 소재 C대학교 임상실습실에서 수행되었다.

치과 에어로졸 내 입자의 흐름을 가시화하기 위해 형광 염료인 플루오레세인 나트륨(Fluorescein Sodium, $C_{20}H_{10}Na_2O_5$)을 사용하였으며, 실험용액은 멸균 증류수 1 L당 플루오레세인 분말 10 g을 혼합하여 1.0%의 농도로 표준화하였다(13, 14). 에어로졸 발생을 위해 마그네토 방식의 초음파 스케일러(Cavitron Select SPS, Dentsply Sirona, USA)를 사용하였으며, 장비 내 주입수 공급 라인에 제조된 플루오레세인 용액을 연결하여 작동 시 형광 물질이 일정하게 분사되도록 하였다. 스케일러의 주파수는 30 kHz였으며 유량은 사전 실측을 통해 40 ml/min으로 보정하였다. 발생된 용액에 대한 흡인은 실제 임상환경을 최대한 재현하기 위해 구강내에서 일회용 석션팁을 적용하였고, 별도의 구강 외 흡인기는 사용하지 않았다.

실험의 재현성을 확보하기 위해 장비 배치 및 거리는 엄격히 통제하였다. 체어와 체어 간의 거리는 0.80 m, 체어 시트와 바닥은 0.65 m, UV 조명과 구강 사이는 0.35 m, 마네킹 구강과 바닥은 0.70 m로 고정하였다. 또한 실험 환경에서의 변수를 통

제하기 위해 외부 공기의 유입이나 내부 환류에 영향을 줄 수 있는 창문과 문을 모두 폐쇄하였으며, 자연광에 의한 형광 반응의 간섭을 최소화하고자 일몰 후 완전한 암실 상태에서 실험을 수행하였다. 발생된 에어로졸 내 형광 물질을 가시화하기 위해 UV 라이트 조명(BTGD96, TigerXXIe, China)을 사용하였다. 해당 장치는 입력 전압 5 V, 주파수 50 Hz, 385~400 nm 파장의 사양을 갖추고 있으며, 실험 중 광원의 일관성을 유지하기 위해 조명은 고정된 위치에서 운용되었다.

실험의 숙련도에 따른 오차를 최소화하기 위해 임상 경력 6년 이상의 오른손잡이 치과위생사 3명(여성 2명, 남성 1명)을 선정하였다. 독립 변수는 술자의 작업 위치(7시, 10시 30분, 12시 방향)와 그에 따른 환자 치아 부위, 그리고 손고정 위치로 설정하였다. 술자 위치 7시에서는 우측 상하악 협측 구치부와 좌측 상하악 설측 구치부, 10시 30분에서는 우측 상하악 설측 구치부와 좌측 상하악 협측 구치부, 마지막으로 12시에서는 상하악 전치부 순설면을 스케일링 하였으며, 각 조건에 따른 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 모든 실험 과정은 3회씩 반복 시행되었다.

3명의 술자가 다음과 같은 조건을 준수하여 스케일링을 수행하였다. 1) 스케일러를 적용하는 힘은 20 g으로 진행한다. 2) 스케일러의 팁은 측면의 끝 2~3 mm가 치아에 닿도록 한다. 3) 한 치아당 3회의 일정한 스트로크를 시행한다. 4) 치간 사이를 포함한다.

분포 패턴의 기록을 위해 4 K 캠코더(FDR-AX700, Sony, Japan)를 마네킹 구강으로부터 좌측 수평 1 m, 환자 복부 상단, 구강 상단 수직 30 cm 거리에 설치하여 고해상도 영상을 촬영하였다. 그러나, 환자의 복부 상단 카메라는 술자 위치 7시와 10시 30분 방향에서 술자의 우측 상지가 카메라 시야를 차단하는 현상이 발생하여 해당 데이터는 분석에서 제외하였다.

2.2. 이미지 분석

획득한 형광 영상 데이터는 ImageJ 소프트웨어를 이용하여 정량적으로 분석하였다(Figure 1). 먼저 촬영된 영상에서 같은 시간대의 이미지를 추출한 뒤 컬러 이미지를 8-bit Grayscale로 변환한 후, 분석의 가시성을 높이기 위해 특정 색상 영역으로 매핑하는 전처리 과정을 거쳤다. 이후 임계값(Threshold) 설정을 통한 이진화 단계를 수행하여, 형광 입자가 부착된 영역은 하얀색(255)으로, 배경은 검정색(0)으로 명확히 분리하였다. 데이터 분석의 객관성을 유지하기 위해 카메라에 촬영된 전체 화면 영역을 관심영역(Region of Interest, ROI)으로 설정하여 분석을 진행하였다. 다만, 에어로졸이 구강 외로 분포되는 순수 면적만을 확인하기 위하여, 설정된 ROI 내에서 실제 구강 내부와 겹치는 영역은 측정 범위에서 제외하는 마스킹 과정을 거쳤다(Figure 1-d-3). 최종적으로 보정된 ROI 내에서 흰색으로 추출된 픽셀의 총 합을 계산하여 에어로졸의 확산 면적을 정량화하였다.

2.3. 통계적 방법

본 연구에서 수집된 데이터는 SPSS Statistics (version 25.0, IBM Corp., Armonk, NY, USA)를 이용하여 분석하였다. 각 측정값은 평균과 표준편차로 산출하였으며, 표본의 크기가 작고 정규분포를 가정할 수 없으므로 비모수 검정을 시행하였다. 술자의 작업 위치(7시, 10시 30분, 12시)에 따른 에어로졸의 오염도를 검정하기 위해 Kruskal-Wallis test를 시행하였으며, 통계적으로 유의미한 차이가 있는 경우, 각 그룹간의 구체적인 차이를 확인하지 위해 Dunn's test를 이용하여 사후검정을 실시하고, 모든 통계적 유의수준은 $p<0.05$로 설정하였다. 비모수 분석에 활용된 데이터는 술자별로 3회씩 촬영된 스케일링 영상에서 술자 및 카메라 위치별로 같은 시간대의 사진을 추출한 2장으로 분석하였다.

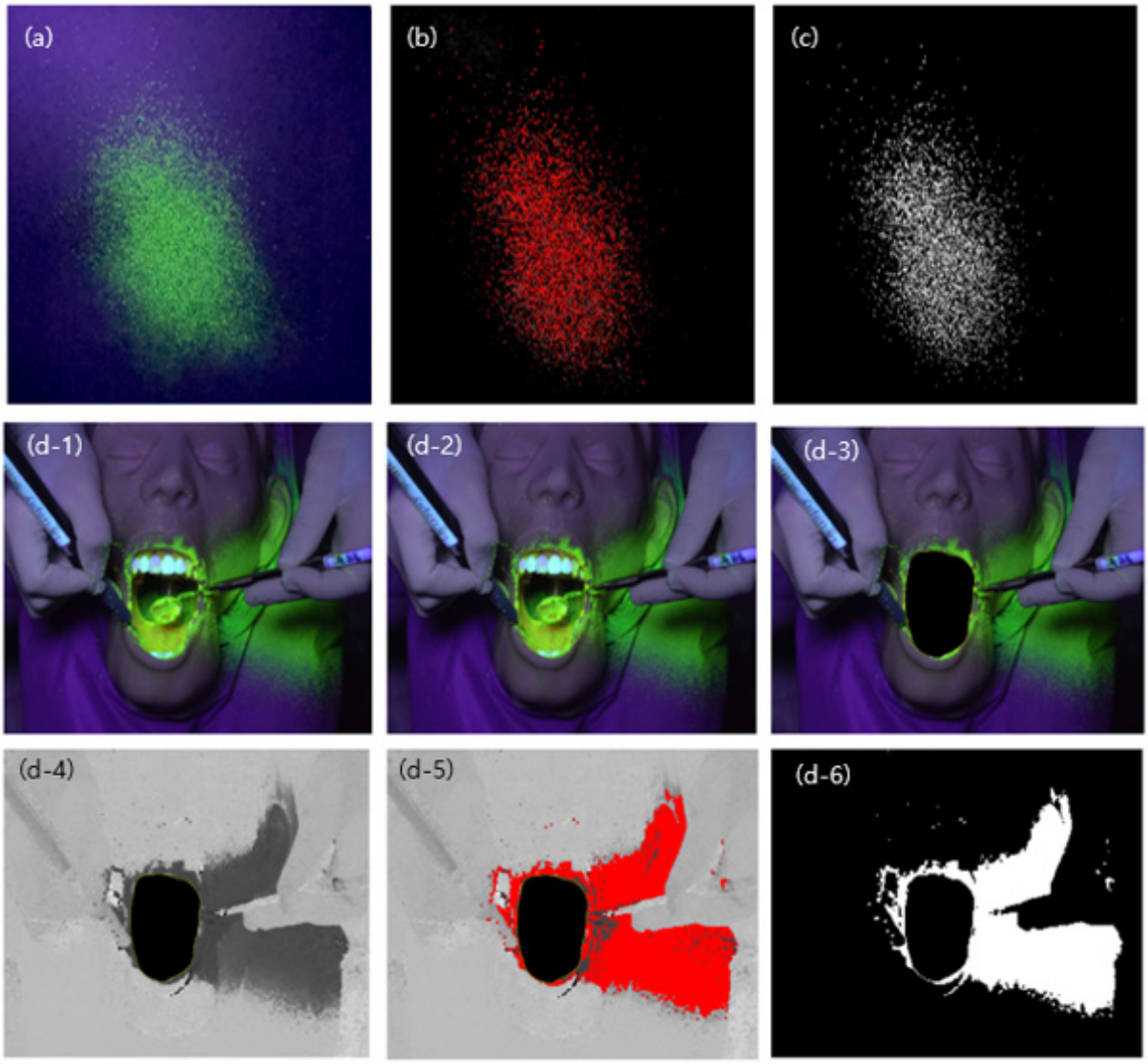


Figure 1. Workflow of fluorescence image analysis. (a–c) Example processing of fluorescent particles: (a) raw; (b) color-mapped; (c) binarized images. (d) Step-by-step refinement of experimental data: original image: (d-1) original image; (d-2) definition of region of interest; (d-3) removal of intraoral area; (d-4) grayscale conversion; (d-5) detection of fluorescence; (d-6) generation of binary mask.

3. 연구결과

3.1. 술자 위치별 에어로졸 분포 패턴의 시각적 분석

본 연구에서 3명의 술자(A, B, C)가 각각 7시, 10시 30분, 12시 방향에서 스케일링을 시행한 결과(Figure 2, 3), 작업 위치에 따라 치과 에어로졸 분포 양상이 상이하게 관찰되었으며 특히 12시 방향에서 전치부 스케일링을 시행하였을 때 가장 광범위한 분포 패턴이 확인되었다.

Figure 2는 촬영 위치를 마네킹 구강의 좌측 수평으로 설정하고 스케일링을 시행하였을 때의 연구결과이다. 술자 위치 7시 방향에서 스케일링을 시행하였을 때, 대구치의 경우 구외로 튀는 형광입자가 거의 발견되지 않았으며, 소구치로 이동할

수록 구외로 분출되어 환자의 좌측 협부와 좌측 흉부에 소량의 형광입자가 관찰되었다(Figure 2-b, 2-h, 2-n). 10시 30분에서는 분포되는 형광 입자의 양이 육안으로도 가장 적게 확인되었으며, 대구치 부위를 스케일링 할 때는 구외로 튀는 형광입자가 거의 없었고, 소구치로 이동할수록 구외로 분출되는 형광입자가 소량 관찰되었다(Figure 2-c, 2-d, 2-i, 2-j).

반면, 12시 방향에서 전치부 스케일링을 시행했을 때 모든 술자에게서 가장 강력한 분포 패턴이 확인되었다. 특히, 스케일러가 치간 사이를 관통할 때, 에어로졸이 공중으로 날카롭고 높게 분포되어 술자의 흉부와 안면 방향으로 직접 전달되는 부채꼴 모양의 확산 궤적이 뚜렷하게 관찰되었다(Figure 2-f).

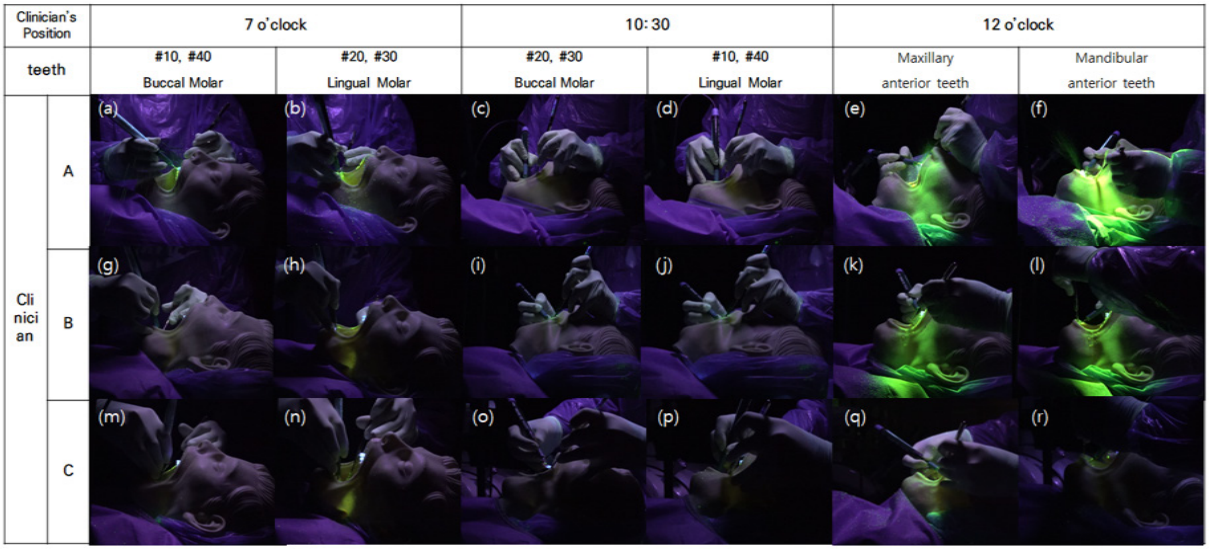


Figure 2. Representative fluorescence images of aerosol dissemination at different operator positions (Horizontal view).

마네킹 상방 수직 촬영 이미지(Figure 3) 분석 결과, 7시와 10시 30분 술자 위치 모두에서 구강 주위 형광 물질이 확인되었으나, 분포 범위와 양은 10시 30분보다 7시 위치에서 더 넓게 나타났다(Figure 3-b, 3-d). 12시 방향에서는 형광 물질이 마네킹의 좌측 협부와 귀, 환자의 좌측 흉부를 넘어 리트렉션을 하고 있는 술자의 좌측 손과 기구 전체, 왼쪽 허벅지를 덮을 정도로 넓게 도포된 양상을 보여(Figure 3-f, 3-k), 12시 방향이 진료실 내 오염에 가장 취약한 조건임을 확인할 수 있었다.

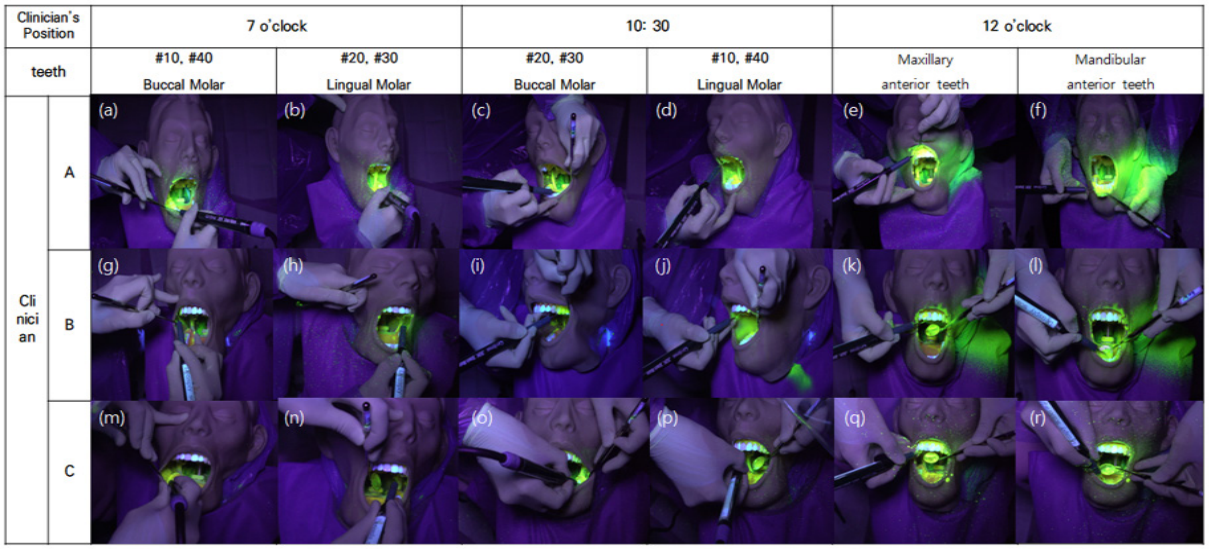


Figure 3. Representative fluorescence images of aerosol dissemination at different operator positions (Vertical view).

3.2. 술자 작업 위치에 따른 에어로졸 분포 면적 분석

플루오레세인 가시화 기법과 ImageJ를 활용하여 카메라 촬영 각도별 술자의 작업 위치에 따른 에어로졸 분포 면적 비율(%)을 분석한 결과는 Table 1과 같다.

술자의 작업 위치가 12시 방향일 때 에어로졸의 분포 면적이 가장 광범위하게 나타났으며, 분포 면적 비율은 수직 촬영 시 17.17±3.00%, 수평 촬영 시 13.18±1.30%로 산출되어 타 위치에 비해 압도적으로 높은 검출량을 보였다.

반면, 10시 30분 방향에서 에어로졸 분포 면적이 가장 낮게 측정되었다(수직 0.42±0.39%, 수평 0.39±0.36%). 7시 방향의 경우 수직 촬영 시 1.40±1.02%, 수평 촬영 시 1.35±1.60%의 면적 비율을 보여 10시 30분 방향보다는 다소 높았으나, 12시 방향과 비교했을 때는 매우 낮은 수준의 분포량을 나타냈다.

카메라 위치(수직/수평)에 따른 술자 위치별 오염도를 Kruskal-Wallis 검정한 결과, 통계적으로 유의하였으며(수직 p=0.002, 수평 p=0.003), 수평보다 수직 방향에서 측정된 에어로졸 면적 비율이 모두 높게 관찰되었다. 특히 분포량이 가장 많았던 12시 방향의 경우 수직 방향(17.17%)에서 측정된 오염 면적이 수평 방향(13.18%)보다 넓게 나타나는 특징을 보였다.

Table 1. Comparison of aerosol dispersion area ratio(%) according to camera capture angle and working position of the clinician

Camera angle	Clinician's position	Clinician (Mean±SD*)			Total Mean±SD*	p[a]
		A	B	C		
Vertical	7 o'clock	2.01±0.02	2.10±0.12	0.08±0.07	1.40±1.02[a,b]	0.002
	10:30	0.87±0.01	0.06±0.05	0.33±0.31	0.42±0.39[a]	
	12 o'clock	20.88±0.31	15.97±1.25	14.65±0.63	17.17±3.00[b]	
Horizontal	7 o'clock	3.32±0.28	0.64±0.87	0.09±0.06	1.35±1.60[a]	0.003
	10:30	0.75±0.33	0.27±0.34	0.14±0.17	0.39±0.36[a]	
	12 o'clock	13.67±2.18	13.73±0.67	12.13±0.37	13.18±1.30[b]	

*SD: Standard Deviation
[a]p-value determined by Kruskal-Wallis test to compare the three clinician positions (p<0.05)
[a,b]: The same letters indicate no statistically significant difference by Dunn's post-hoc test (p<0.05).

4. 고안

본 연구는 플루오레세인 형광 가시화 기법과 ImageJ 분석을 활용하여 치과 스케일링 시 발생하는 에어로졸의 확산 양상을 보다 정밀하게 정량화하고, 술자의 작업 위치와 카메라 촬영 각도에 따른 에어로졸 분포 면적 비율(%)을 산출하고자 진행되었다. 연구 결과, 술자의 작업 위치에 따라 에어로졸 분포 패턴에 차이가 있음을 확인하였다. 특히 12시 방향에서 전치부 스케일링을 시행할 때 발생하는 에어로졸의 분포 위험성이 두드러지게 나타나, 치과 감염관리 시 모든 작업 위치에서 에어로졸이 발생함을 인지함과 동시에 특정 위치에서의 더욱 철저한 감염관리 전략이 요구된다.

주요 연구 결과, 술자의 작업 위치가 12시 방향이고, 환자의 치아가 전치부일 때 에어로졸의 분포 면적이 17.17%으로 가장 광범위하게 나타났으며, 10시 30분 방향에서 0.42%로 가장 낮은 분포 면적을 기록하였다. 이러한 결과는 구강 내 해부학적 구조와 술자의 스케일러 적용 각도에 기인한 것으로 판단된다. 구치부 스케일링의 경우, 환자의 협측 점막이 스케일러에서 분사되는 에어로졸을 일차적으로 차단하는 차폐막 역할을 수행하여 외부 분포를 억제하고 술자의 시야 확보를 위해 환자의 구강을 작게하여 협측부를 깊게 리트렉션 하는 반면, 전치부는 입술의 개방도가 높고 차폐 구조가 부족하여 초음파 스케일러의 고주파 진동으로 발생한 미세 수분 입자가 구강 외로 직접 분출되기 쉬운 환경을 형성한다. 특히 12시 방향에서의 전치부 접근은 에어로졸이 환자의 안면과 흉부 방향으로 직선으로 분포되는 직선형 궤적을 형성하며 스케일러 팁이 치간으로 삽입될 때, 팁에서 방출되는 주입수가 치면에 직사됨에 따라 분포 에너지가 분산되지 않고 특정 방향으로 반사되어 가장 높은 오염도를 나타낸 것으로 보인다. 전치부와 구치부에 핸드피스를 적용하였을 때 전치부에서 더 많은 양의 에어로졸이 확인되었다는 기존 문헌(15)이 본 연구 결과를 뒷받침한다.

본 연구는 카메라 프레임 범위내의 에어로졸에 국한되어 있지만 초음파 스케일링에 대한 체계적 문헌고찰(16)에 따르면, 대부분의 연구에서 술자의 머리와 목, 흉부와 전완부 그리고 보조자의 마스크 아래(흉부)에도 오염이 확인된 것으로 보아 본 연구에서 확인된 환자에게 튀는 에어로졸뿐 아니라 의료진에게도 다량의 에어로졸이 침착된다는 것을 알 수 있다. 또한 Fennelly M et al.(17)의 광학입자 계수기를 이용한 연구에 따르면 상악 우측 제1대구치 스케일링 시, 스케일링 전의 환경보다 약 84배 높은 에어로졸이 검출되었으며, 하악 우측 제1대구치 스케일링 시, 약 11배 높은 에어로졸이 측정되었다고 한다. 이를 통해 본 연구의 구치부 스케일링 시 육안으로 관찰된 에어로졸의 침착은 적었지만, 공기 중에 부유하는 에어로졸은 상당한 것을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서는 대용량 진공 석션(High-volume evacuators, HVE)를 적용하지 않은 상태에서 실험을 진행하였다. 그러나, 선행연구에 따르면, HVE를 사용하면 오염을 90% 이상 감소시킬 수 있으며(18-20), HVE 단독 사용 시 발생하는 일시적인 에어로졸 확산 또한 환기 장치를 병행할 경우 감지 가능한 수준 이하로 억제할 수 있다고 보고된바 있다(21). 따라서 임상 환경에서 비말 및 에어로졸로 인한 오염을 최소화하기 위해서는, 통상적으로 사용되는 저용량 석션에 국한되지 않고 추가적인 에어로졸 저감장치를 적극적으로 활용할 것을 권장한다.

촬영 각도에 따른 차이를 비교했을 때, 12시 방향에서 수직 촬영이 수평 촬영보다 일관되게 높은 수치를 기록하였다(17.17% vs 13.18%). 이러한 차이는 에어로졸 입자가 주로 환자의 가슴이나 주변 바닥과 같은 평면에 침착되는 특성상, 위에서 아래로 내려다보는 수직적 시야가 분포된 입자를 더 정확하게 식별할 수 있음을 의미한다. 한편, 본 실험은 카메라의 위치를 마네킹 구강 상단(수직), 좌측(수평), 환자의 복부 상단(수평) 세 지점으로 고정하여 진행하였으나, 환자의 복부 상단의 카메라는 술자 위치 7시와 10시 30분 방향에서 술자의 우측 상지가 카메라 시야를 차단하는 현상이 발생하였다. 또한, 남성 술자가 스케일링을 시행할 때, 일부 위치에서 신체적 조건(손의 크기)으로 인해 카메라 사각지대가 발생하기도 하였다. 이러한 신체적 간섭은 정확한 영상분석에는 한계점으로 작용하였으나, 임상적 관점으로는 술자의 손이나 팔이 구강에서 분출되는 에어로졸을 물리적으로 차단하는 의도치 않는 차폐막의 역할을 수행했을 가능성이 있다. 즉, 술자의 위치뿐 아니라 체격이나 작업 자세에도 에어로졸의 확산 궤적이 변형되거나 억제될 수 있음을 의미한다.

기존 문헌(11)에 따르면 치과 진료 시 발생하는 에어로졸의 입자 크기는 분사 기구에 가까울수록 크며 거리에 따라 감소하는 경향을 보인다. 특히 핸드피스(0.49±2.98 mm)와 초음파 스케일러(0.05±0.24 mm)를 비교했을 때, 스케일러는 상대적으로 매우 미세한 입자를 생성하여 중력에 의해 표면에 낙하하기보다는 공기 중에 장시간 부유하는 특성을 가진다. 이러한 입자의 거동은 본 연구의 ImageJ로 분석한 결과에서 스케일링 시 측정된 형광 면적이 실제 발생량보다 과소평가되었을 가능성을 시사한다. 구치부 스케일링 시에는 협측 점막이 물리적 장벽 역할을 하여 큰 입자의 전방 확산을 차단하는 반면, 전치부는 이러한 차폐 구조가 거의 없어 큰 입자가 카메라 프레임 내인 환자의 안면 및 흉부에 더 많이 안착할 수 있는 환경이다. 그러므로 구치부 진료 시 눈에 보이는 비말 침착이 적더라도, 육안으로 확인하기 어려운 부유 에어로졸의 잠재적 위험성을 충분히 고려해야 한다.

모든 위치에서 유의미한 오염이 관찰된 것은 다른 연구 결과들과 일치하며(22-24), 이는 적절한 개인보호장비의 필요성을 다시 한번 강조한다. 특히, 코로나-19 이후 의료진의 경우 개인보호구 착용에 대한 실천도가 많이 향상하였으나, 스케일링, 고속 및 저속 핸드피스, 3-way syringe를 사용할 때 환자의 얼굴과 가슴부근에 발견된 에어로졸이 다량 있었음(24)에도 불구하고, 임상 현장에서는 환자의 안면 보호나 가슴 부위 오염방지를 위한 적극적인 조치가 부족한 상황이다. 이는 진료 후 환자의 의복이나 피부를 통한 2차 교차 감염의 원인이 될 수 있기에, 비말 발생이 빈번한 술식에서는 의료진뿐 아니라 환자를 위한 보호구의 적극적인 활용이 필요하다.

본 연구에는 몇 가지 한계점이 존재한다. 첫째, 플루오레세인 가시화 기법은 상대적으로 입자가 큰 사이즈의 에어로졸의 침착을 추적하는 데는 매우 효과적이나, 공중에 장시간 부유하는 미세 에어로졸을 나타내기 어렵다는 것이다. 둘째, 실제 임상 환경에서는 소량의 혈액과 타액이 다량의 치과용수와 혼합되면서 병원체 농도가 희석되어, 실제 감염위험이 본 실험의 가시화 결과보다 낮게 나타날 가능성이 있다. 그러나, 치과용수 자체에서도 유의미한 수준의 병원체가 발견된다는 선행 연구(25-27)를 고려할 때, 진료 중 발생하는 비말과 에어로졸에 대한 경계는 여전히 중요하다. 또한, 스케일링 시 발생하는 에어로

졸을 형광 가시화하였다는 점에서 교육 효과를 높게 평가할 수 있다. 뿐만 아니라 에어로졸을 가시화한 기존 연구들과 비교하였을 때, 스케일링 시 발생하는 에어로졸의 확산 양상을 술자의 위치에 따라 시각화하고 정량적으로 분석하였다는 점에서 학술적 차별성을 가진다.

향후 연구에서 미세 에어로졸을 정량화 할 수 있는 광학 입자 계수기(28)를 통한 실험 결과와 교차 검증한다면, 보다 과학적인 치과 감염관리 프로토콜 수립에 기여할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구는 플루오레세인 형광 가시화 기법과 ImageJ 분석방법을 도입하여, 육안으로 식별하기 어려웠던 초음파 스케일링 시의 에어로졸 확산 양상을 정밀하게 시각화하고 정량적 수치로 규명하였다. 연구 결과, 12시 작업 위치는 타 위치 대비 압도적인 에어로졸 분사량을 보였으며, 술자의 안면 및 흉부뿐만 아니라 환자의 신체 상부까지 광범위한 오염을 유발하는 가장 취약한 조건임이 증명되었다. 이는 진료 위치 선정 자체가 감염 관리의 독립적인 변수가 될 수 있음을 시사한다. 따라서 임상 현장에서는 본 연구에서 제시된 위치별 위험도를 바탕으로, 고위험 작업 시 고성능 흡입기의 위치 최적화와 술자 및 환자를 위한 물리적 차폐를 고려해야 한다. 본 연구의 결과는 향후 치과 진료실 내 감염 방지 가이드라인을 구체화하고, 효율적인 진료 환경을 설계하는 데 중요한 과학적 근거 자료로 활용될 것이다.

Author contributions

Conceptualization: HN Kim. Formal analysis: NY Lee. Investigation: NY Lee. Methodology: HN Kim. Supervision: HN Kim. Validation: NY Lee. Writing—original draft: NY Lee. Writing—review & editing: NY Lee.

References

1. Bennett AM, Fulford MR, Walker JT, Bradshaw DJ, Martin MV, Marsh PD. Microbial aerosols in general dental practice. Br Dent J 2000;189(12):664-667. 10.1038/sj.bdj.4800859.
2. Miller RL. Characteristics of blood-containing aerosols generated by common powered dental instruments. Am Ind Hyg Assoc J 1995;56(7):670-676. 10.1080/15428119591016683.
3. Matys J, Grzech-Leśniak K. Dental aerosol as a hazard risk for dental workers. Materials 2020; 13(22):5109. 10.3390/ma13225109.
4. Choudhary S, Bach T, Wallace MA, Stoeckel DC, Thornhill MH, Lockhart PB, et al. Assessment of infectious diseases risks from dental aerosols in real-world settings. In Open forum infectious diseases 2022; 9(11):ofac617. 10.1093/ofid/ofac617.
5. Pascolo L, Zupin L, Melato M, Tricarico PM, Crovella S. TMPRSS2 and ACE2 coexpression in SARS-CoV-2 salivary glands infection. J Dent Res. 2020;99(10):1120-1121. 10.1177/0022034520933589.
6. Zemouri C, Volgenant CMC, Buijs MJ, Crielaard W, Rosema NAM, Brandt BW, et al. Dental aerosols: microbial composition and spatial distribution. J Oral Microbiol. 2020;12(1):1762040. 10.1080/20002297.2020.1762040.
7. Watanabe A, Tamaki N, Yokota K, Matsuyama M, Kokeguchi S. Use of ATP bioluminescence to survey the spread of aerosol and splatter during dental treatments. J Hosp Infect 2018; 99(3):303-305. 10.1016/j.jhin.2018.03.002.
8. Holloman JL, Mauriello SM, Pimenta L, Arnold RR. Comparison of suction device with saliva ejector for aerosol and spatter reduction during ultrasonic scaling. J Am Dent Assoc 2015;146(1):27-33. 10.1016/j.adaj.2014.10.001.

9. Kim MJ, Kuroda M, Kobayashi Y, Yamamoto T, Aizawa T, Satoh K. Visualization of airborne droplets generated with dental handpieces and verification of the efficacy of high-volume evacuators: an in vitro study. BMC Oral Health 2023;23(1):976. 10.1186/s12903-023-03725-1.
10. Newsom R, Pattison C, Amara A, Louca C. Detection of dental fomites using topical fluorescein. Br Dent J 2022;1-3. 10.1038/s41415-022-4403-7.
11. Allison JR, Currie CC, Edwards DC, Bowes C, Coulter J, Pickering K, et al. Evaluating aerosol and splatter following dental procedures: Addressing new challenges for oral health care and rehabilitation. J Oral Rehabil 2021;48(1):61-72. 10.1111/joor.13098.
12. Harrel SK, Molinari J. Aerosols and splatter in dentistry: a brief review of the literature and infection control implications. J Am Dent Assoc 2004;135(4):429-437. 10.14219/jada.archive.2004.0207.
13. Han P, Li H, Walsh LJ, Ivanovski S. Splatters and aerosols contamination in dental aerosol generating procedures. Applied Sciences 2021;11(4):1914. 10.3390/app11041914.
14. Veena HR, Mahantesha S, Joseph PA, Patil SR, Patil SH. Dissemination of aerosol and splatter during ultrasonic scaling: a pilot study. J Infect Public Health 2015;8(3):260-265. 10.1016/j.jiph.2014.11.004.
15. Beltrán EO, Allison JR, Jakubovics NS, Castellanos JE, Holliday R, Velandia-Romero ML, et al. Control of viral aerosol dispersion during simulated dental procedures. Int Dent J 2025; 75(6): 103963. 10.1016/j.identj.2025.103963.
16. Johnson IG, Jones RJ, Gallagher JE, Wade WG, Al-Yaseen W, Robertson M, et al. Dental periodontal procedures: a systematic review of contamination (splatter, droplets and aerosol) in relation to COVID-19. BDJ open 2021;7(1):15. 10.1038/s41405-021-00070-9.
17. Fennelly M, Gallagher C, Harding M, Hellebust S, Wenger J, O'Sullivan N, et al. Real-time monitoring of aerosol generating dental procedures. J Dent 2022;120:104092. 10.1016/j.jdent.2022.104092.
18. Jacks ME. A laboratory comparison of evacuation devices on aerosol reduction. Journal of dental hygiene 2002;76(3):202-206.
19. Balanta-Melo J, Gutiérrez A, Sinisterra G, Diaz-Posso MDM, Gallego D, Villavicencio J, et al. Rubber dam isolation and high-volume suction reduce ultrafine dental aerosol particles: an experiment in a simulated patient. Applied Sciences 2020;10(18):6345. 10.3390/app10186345.
20. Nagraj SK, Eachempati P, Paisi M, Nasser M, Sivaramakrishnan G, Verbeek JH. Interventions to reduce contaminated aerosols produced during dental procedures for preventing infectious diseases. Cochrane Database Syst Rev 2020;10(10):CD013686. 10.1002/14651858.CD013686.pub2.
21. Melzow F, Mertens S, Todorov H, Groneberg DA, Paris S, Gerber A. Aerosol exposure of staff during dental treatments: a model study. BMC Oral Health 2022;22(1):128. 10.1186/s12903-022-02155-9.
22. Al-Amad SH, Awad MA, Edher FM, Shahramian K, Omran TA. The effect of rubber dam on atmospheric bacterial aerosols during restorative dentistry. J Infect Public Health 2017;10(2):195-200. 10.1016/j.jiph.2016.04.014.
23. Chanpong B, Tang M, Rosenczweig A, Lok P, Tang R. Aerosol-generating procedures and simulated cough in dental anesthesia. Anesth Prog 2020;67(3):127-134. 10.2344/anpr-67-03-04.
24. Innes N, Johnson IG, Al-Yaseen W, Harris R, Jones R, Gallagher JE, et al. A systematic review of droplet and aerosol generation in dentistry. J Dent 2021;105:103556. 10.1016/j.jdent.2020.103556.
25. Hikal W, Kačániova M, Hussein D, Ghit A, Smaoui S, Aleem M, et al. Dental unit waterlines and health risks of pathogenic microbial contamination: An update review. Journal of Biological Studies 2023; 6(4):282-298. 10.62400/jbs.v6i4.8729.
26. Ricci ML, Fontana S, Pinci F, Fiumana E, Pedna MF, Farolfi P, et al. Pneumonia associated with a dental unit waterline. The Lancet 2012;379(9816):684. 10.1016/S0140-6736(12)60074-9.

27. Szymańska J, Sitkowska J, Dutkiewicz J. Microbial contamination of dental unit waterlines. Ann Agr Env Med 2008;15(2):173-179.
28. Lahdentausta L, Sanmark E, Lauretsalo S, Korkee V, Nyman S, Atanasova N, et al. Aerosol concentrations and size distributions during clinical dental procedures. Heliyon 2022;8(10):e11074. 10.1016/j.heliyon.2022.e11074.