

사무공간 구조에 따른 실내공기 중 생물학적 오염분포 특성

원동환 · 허은혜 · 정호철* · 문경환†

고려대학교 보건과학대학 환경보건학과, *GS건설기술연구소

Microbiological Contamination in Office Buildings by Work Space Structure

Dong-Hwan Won, Eun-Hae Huh, Ho-Chul Jeong*, and Kyong-Whan Moon†

Department of Environmental Health, College of Health Science, Korea University, Seoul, Korea

*GS Engineering & Construction Research Institute, Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea

ABSTRACT

Objectives: This study was undertaken in order to evaluate by work space zoning and structure the concentrations of biological contaminants in the indoor air of domestic office buildings.

Methods: Air samples were collected in the office spaces of 15 office buildings in Seoul from June 28 to July 28, 2011. Prior to the sampling, each office was classified into 'open-plan office', 'cellular office' and 'mixed office' according to the work space zoning. To evaluate the biological contamination of indoor air, total suspended bacteria (TSB), Gram positive bacteria (GPB), *Staphylococcus aureus* (S.A), Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA), Gram negative bacteria (GNB) and fungi were investigated. During the sampling, temperature, relative humidity and carbon dioxide (CO₂) were measured.

Results: The TSB concentrations (GM±GSD) were 452 (±1.3) cfu/m³ in open-plan offices, 366 (±1.3) cfu/m³ in cellular offices and 287 (±1.5) cfu/m³ in mixed offices, and there were significant differences between the three groups (p<0.05). The highest concentrations (GM±GSD) of fungi were found in the indoor air of cellular offices 128(±1.0) cfu/m³, which was at least three times higher than the concentrations in mixed offices 43 (±1.0) cfu/m³ (p<0.05).

Conclusions: Microbiological contamination in the indoor air of office buildings by work space structure was the highest with the open-plan office layout which includes no high walls or doors separating the occupants.

Keywords: open plan offices, indoor air quality, microbiological contaminants, office building, work space structure

I. 서 론

현대 사회는 인구 증가와 각종 산업의 발달로 건물이 대형화 되고 있으며, 이런 현상에 발맞춰 에너지 효율을 높이기 위한 방안으로 밀폐형 건물이 증가하고 있다. 그 결과 실내공기질 악화에 따른 건강

위해성의 관심은 높아졌다.¹⁾ 사무직 근로자의 경우 하루 24시간 중 88%는 오피스 빌딩 같은 실내공간에 머무르며, 7%는 교통수단에 머무르고, 나머지 5%만이 실외공간에 머무른다고 한다.²⁾ 유해물질을 취급하는 산업 현장 근로자들보다 건강상의 악영향은 적으나 대부분이 밀폐형 오피스 빌딩 내 근무로 인

†Corresponding author: Department of Environmental Health, College of Health Science, Korea University, Seoul 136-703, Korea, Tel: +82-2-940-2865, Fax: +82-2-943-5304, E-mail: kwmoon@korea.ac.kr

Received: 14 February 2012, Revised: 28 March 2012, Accepted: 7 May 2012

하여 실내공기의 중요성은 점점 증대되고 있다. WHO의 연구 결과에 의하면 실내오염 물질이 실외오염 물질보다 인체의 폐에 전달될 확률이 약 1,000배 정도 높은 것으로 밝혀져 실내 공기가 미치는 영향은 크다고 할 수 있다.³⁾

미국의 경우 사무직 근로자의 20%가 빌딩증후군(SBS; sick building syndrome)의 환경조건에서 근무하고 있다고 한다.⁴⁾ 빌딩관련 질환(BRI; building related illness) 역시 실내 근무와 관련하여 의사의 임상적 진단에 의한 증상이 확인⁵⁾되고 있다. 이는 오피스 빌딩의 실내공기가 실내 환경 내의 유해요인과 밀접한 관련이 있다는 것을 말해준다. 현재 대부분의 밀폐형 오피스 빌딩에서는 공기조화(HVAC; heating ventilation and air conditioning) 시스템을 이용하여 인위적으로 실내 온열 조건을 유지한다. 그러나 일부 오피스 빌딩의 경우 외기 유입이 원활하지 않아 두통, 현기증, 졸음, 집중력 감소 등의 생리학적인 자각증상이 발생하는 것으로 보고⁶⁾되고 있다. 또한, 오염된 외기의 유입으로 인한 실내오염원에는 화분(花粉), 세균, 진균 및 일부 원생동물의 포자(spores) 등 생물학적 입자들이 존재하고,⁷⁾ 이러한 생물학적 입자들을 바이오에어로졸(bioaerosols)이라고 총칭한다.⁸⁾ 일반적으로 실내공기 중 생물학적 유해인자에 노출되면 피부 및 호흡기 등에 감염성질환과 과민성질환(hypersensitivity disease)이 발생된다고 보고⁹⁾된 바 있으며 단기간 노출에도 병원성 미생물의 종류나 성상에 따라 심각한 질병을 야기할 수 있다. 특히, 밀폐형 빌딩 내 생활은 하루 1/3 이상을 차지하는 만큼 생물학적 오염은 중요하다고 할 수 있다.

다양하고 고층화된 현대 건물의 외형에 비해 사무실 공간은 질적으로 매우 열악한 실정이다. 과거 사무공간의 경우는 수직적인 형태로 설계되었다. 이후 1950년대 후반 서독에서 오피스 랜드스케이프(office landscape)와 1960년대 미국에서 사무자동화에 따른 액션오피스(action office)의 개발로 현재의 개방형 사무실 구조(open plan office)가 탄생³²⁾하였다. 또한 국내의 경우 많은 기업들이 효율적인 업무와 생산성 향상, 저렴한 시공비 등의 이유로 시공 전부터 개방형 구조로 설계하고 있다. 최근 국외의 연구 결과에 따르면 90%가 폐쇄형(cellular office) 구조보다 개방형 구조가 신체 및 정신적 건강에 악영향을 끼친다고 보고¹⁰⁾되고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하

여 일부 기업에서는 개방형과 폐쇄형을 적절하게 섞은 혼합형(mixture office)으로 시공하고 있다. 또한, 실제 사무공간에서 실내공기질에 대한 불만 및 요구 사항은 끊임없이 발생되고 있지만 기존의 연구는 오피스 빌딩의 실내공기 중 생물학적 오염물질의 농도 실태만 보고^{6,11-15)}되었다. 따라서 본 연구에서는 국내 일부 오피스 빌딩의 실내공기 중 사무공간 구조에 따른 환경적 특성 및 온도, 습도, 이산화탄소와 생물학적 오염분포 특성을 파악하였다.

II. 연구방법

1. 조사대상 및 기간

서울 소재 오피스 빌딩 15개를 임의로 선정하여 2011년 6월 28일부터 7월 28일까지 사무공간의 실내공기에서 생물학적 오염 농도를 조사하였다. 측정 시간은 근로자들의 근무시간(09:00~18:00)을 오전과 오후로 분류하여 각 1회씩 측정하였다. 측정대상 빌딩은 전체 층수를 기준으로 층수의 1/3 이하를 저층, 1/3-2/3을 중층, 2/3 이상을 고층으로 분류하여 저층, 중층, 고층의 중간층을 측정위치로 선정하였다.

2. 측정항목 및 방법

1) 온·습도 및 이산화탄소

온열환경 조사를 위한 온·습도계는 사용 전 제조사에 의뢰하여 보정된 디지털 방식의 측정기(SATO SK-L200T, Japan)로 이산화탄소는 비분산적외선 방식의 디지털 측정기(HORIBA VA-3000, Japan)를 사용하였다. 측정 전 이산화탄소 측정기는 표준가스(400, 900, 1600 ppm)로 보정하였다.

2) 생물학적 오염

생물학적 오염 미생물로는 총 부유세균(Total suspended bacteria, TSB), 그람양성균(Gram positive bacteria, GPB), 황색포도상 구균(*Staphylococcus aureus*, S.A), 항생제 내성 황색포도상 구균(Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*, MRSA), 그람음성균(Gram negative bacteria, GNB), 부유진균(Fungi)을 측정하였다. 생물학적 오염에 대한 시료는 관성 충돌방식의 미생물 포집기(MAS-100, Merck, Germany) 2대를 동일한 장소에 설치하여 duplication 방식으로 채취하였다. 시료는 포집 대상에 따라 각기 특성화

되어 있는 배지를 미생물 포집기에 고정시킨 후 각 층의 구조별 대표지점(바닥면에서 1.5 m 높이 이상)에서 200 l의 공기를 포집하였다. 또한, 실내농도와 외부농도의 비교를 위해 외부에서 오전 및 오후 각 1회씩 측정하였다. 미생물 포집기는 사용 전에 독일 Merck社에 의뢰하여 보정 하였다. 채취 대상 배지로 총 부유세균은 Tryptic soy agar(Difco, USA), 그람 양성균은 Phenylethanol agar/5% sheep blood(한일 코메드, Korea), 황색포도상 구균은 CHROMagar™ *Staph aureus*(Chromagar, France), 항생제 내성 황색포도상 구균은 CHROMagar™ MRSA(Chromagar, France), 그람음성균은 MacConKey agar(Difco, USA), 부유진균은 Sabouraud dextrose agar(Difco, USA)를 사용하였다. 총 부유세균의 경우, 진균의 성장을 억제하기 위해 배지에 시클로헥시미드(Cycloheximide; CHX) (0.1 g/l)를 넣었으며, 부유진균의 경우 다른 세균의 성장을 억제하기 위해 배지에 클로람페니콜(Chloramphenicol; CAP) (0.1 g/l)을 넣어 사용하였다. 미생물의 배양조건은 총 부유세균(TSB), 황색포도상 구균(S.A), 항생제 내성 황색포도상 구균(MRSA), 그람음성균(GNB)은 37°C에서 1~2일, 그람양성균(GPB)은 37°C/5% CO₂에서 1~2일, 부유진균(Fungi)은 25°C에서 3~5일 배양하였다. 배양된 모든 미생물은 집락의 성장 및 집락수(CFU, Colony Forming Unit)를 관찰한 계수 값에 공기량으로(m³) 나누어 결과를 도출하였다.

3. 통계 분석

자료 분석은 SPSS 통계프로그램(SPSS Ver. 12.0)을 사용하여 사무공간 구조와 각 환경인자 및 생물학적 오염을 비교하기 위해 일원분산분석(one-way

ANOVA) 및 Duncan의 다중비교분석(multiple comparison)을 실시하였다.

III. 연구결과

1. 오피스 빌딩의 특성

15개 오피스 빌딩의 준공년수, 건물층수, 연면적, 공조유무 등의 현황을 파악하였으며, 각 빌딩들의 평균 재원 및 특성은 Table 1과 같다. 사무공간 구조는 15개 오피스 빌딩을 검토하여 개방형(open plan office), 폐쇄형(cellular office), 혼합형(mixture office)으로 분류하여 Fig. 1과 같다. 한개 층을 기준으로

Table 1. Characteristics of office buildings investigated in this study

Building age (years)	Building floor	Total square (m ²)	Presence of HVAC
2	13	15,873	×
12	48	141,552	O
14	13	7,348	O
5	15	16,359	O
26	13	28,058	O
2	12	7,663	O
11	9	74,577	O
41	21	39,907	O
34	25	132,806	O
5	8	7,031	O
12	18	37,472	O
25	22	35,841	O
32	17	27,162	O
26	14	10,211	O
4	26	84,132	×
16	18	44,400	-

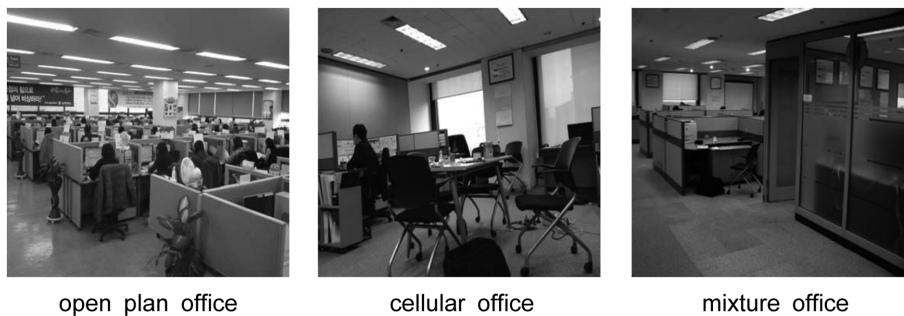


Fig. 1. Classification of office space.

출입문을 제외하고 격벽 없이 책상과 책상 사이를 칸막이(partition)만으로 조성된 곳은 개방형이고, 격벽이 존재하여 흡사 벌집 같은 공간으로 조성된 곳은 폐쇄형으로 하였다. 또한, 한 층에 개방형과 폐쇄형이 일정 비율(5:5)로 조성된 곳은 혼합형으로 하였다. 다만, 폐쇄형의 경우 사무실과 사무실 격벽 사이에 출입문이 없는 경우는 제외하였다. 측정 당시 공조 시스템이 없는 2개의 빌딩을 제외하곤 대부분의 빌딩이 일정 시간동안 외기(OA; outdoor air) 도입 후 내기(IA; indoor air)와 혼합하는 방식으로 운영되고 있었다.

2. 실내공기질 측정결과

1) 온 · 습도

실내온도와 상대습도는 근로자들에게 열적 편안함을 주는 중요한 요인으로 작용한다. 사무공간 구조에 따른 실내온도는 오전 9:00부터 오후 18:00까지 1시간 간격으로 측정된 전체 평균(Mean±SD)으로 개방형이 25.6±1.0°C, 폐쇄형이 25.9±1.1°C, 혼합형이 25.3±1.0°C 이었다. 상대습도의 경우 개방형은 58.9±7.0%, 폐쇄형은 55.2±7.0%, 혼합형이 59.7±7.0%이었다. 2개 빌딩을 제외한 대다수 빌딩의 실내온도는 사무공간 구조에 따라 큰 차이가 없었다. 상대습도의 경우 폐쇄형이 개방형에 비해 낮은 것을 확인하였고(p<0.05), 일부 빌딩은 동일한 위치에도 불구하고 상대습도는 ±10%의 차이를 보였다.

2) 이산화탄소

이산화탄소는 실내에서 공기오염의 정도를 파악할

수 있는 척도로서 주요 발생은 외부영향보다 근로자들의 호흡 시 배출되는 것이 원인이다. 사무공간의 구조에 따른 이산화탄소 평균농도(Mean±SD)는 개방형이 913±120 ppm, 폐쇄형이 750±118 ppm, 혼합형이 724±113 ppm으로 조사되었다. 본 연구에서 이산화탄소는 재실율과 높은 상관관계를 보였으며(p<0.01), 같은 면적 대비 재실율의 차이는 개방형>폐쇄형>혼합형 순으로 조사되었다. 또한, 구조에 따른 재실율과 이산화탄소의 상관관계에서 개방형은 통계적 유의성을 보였다(p<0.05). 본 조사대상 15개 오피스 빌딩에서 이산화탄소 관리기준 1,000 ppm(산업안전보건법 제27조 제1항의 규정 사무실공기관 리치침 제2조)을 초과한 곳은 개방형이 3개소, 폐쇄형이 1개소였다.

3) 생물학적 오염현황

(1) 사무공간 구조에 따른 생물학적 오염현황

Table 2는 사무공간 구조에 따른 부유 미생물의 농도를 나타낸 것이다. 총 부유세균의 평균농도(GM±GSD)는 개방형이 452(±1.3)cfu/m³, 폐쇄형이 366(±1.3)cfu/m³, 혼합형이 287(±1.5)cfu/m³으로 개방형에서 총 부유세균 농도가 가장 높게 나타났고, 세 그룹 간에 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.05). 그람양성균은 개방형이 308(±1.3)cfu/m³, 폐쇄형이 253(±1.4)cfu/m³, 혼합형이 188(±1.3)cfu/m³으로 조사되었으며, 세 그룹 간에 유의한 차이를 보였다(p<0.05). 인간에게 식중독을 일으키는 원인으로 알려진 황색포도상 구균(*Staphylococcus aureus*; S.A)의 경우 개방형이 77(±1.2)cfu/m³, 폐쇄형이

Table 2. Comparison of microbiological contaminants according to office structure of general office buildings

	Open plan office		Cellular office		Mixture office	
	GM (±GSD) ¹⁾	I/O ratio ²⁾	GM (±GSD)	I/O ratio	GM (±GSD)	I/O ratio
TSB (cfu/m ³)	452 (±1.3)*	2.55	366 (±1.3)*	2.00	287 (±1.5)*	1.73
GPB (cfu/m ³)	308 (±1.3)*	3.30	253 (±1.4)*	2.80	188 (±1.3)*	2.08
S.A (cfu/m ³)	77 (±1.2)	1.95	79 (±1.0)	2.06	68 (±1.2)	1.91
MRSA (cfu/m ³)	13 (±1.1)	3.25	5 (±1.2)	1.5	5 (±1.0)	1.25
GNB (cfu/m ³)	7 (±1.1)	0.38	5 (±1.0)	0.23	10 (±1.3)	0.47
Fungi (cfu/m ³)	70 (±1.0)	0.34	128 (±1.0)*	0.63	43 (±1.0)	0.25

*TSB (Total suspended bacteria), GPB (Gram positive bacteria), SA (*Staphylococcus aureus*), MRSA (Methicillin-resistant *staphylococcus aureus*), GNB (Gram negative bacteria)

¹⁾Geometric mean±Geometric standard deviation

²⁾Ratio of indoor and outdoor concentration

^{*)}p<0.05

79(±1.0)cfu/m³, 혼합형이 68(±1.2)cfu/m³ 으로 조사되어 각 사무공간에서 비슷한 결과를 보였다. 또한, 그람양성구균 중 메티실린 항생제에 내성을 보이는 황색포도상 구균(Methicillin resistant *staphylococcus aureus*; MRSA)의 경우 개방형이 13(±1.1)cfu/m³, 폐쇄형이 5(±1.2)cfu/m³, 혼합형이 5(±1.0)cfu/m³으로 MRSA 역시 다른 구조보다 개방형이 높은 결과를 보였다. 그람음성균은 개방형이 7(±1.1)cfu/m³, 폐쇄형이 5(±1.0)cfu/m³, 혼합형이 10(±1.3)cfu/m³으로 대부분 낮게 측정되었고, 각 사무공간의 유의성은 없었다(p>0.05). 부유진균의 경우 개방형이 70(±1.0)cfu/m³, 폐쇄형이 128(±1.0)cfu/m³, 혼합형이 43(±1.0)cfu/m³으로 다른 미생물과는 달리 폐쇄형이 높은 것으로 조사되었다(p<0.05). Table 2에 나타난 바와 같이 사무공간 구조에 따른 총 부유세균의 I/O ratio는 개방형이 2.55, 폐쇄형이 2.00, 혼합형이 1.73으로 개방형이 높았다. 그람양성균 역시 개방형이 3.30, 폐쇄형이 2.80, 혼합형이 2.08로 개방형이 높은 결과를 보였다. 이는 개방형 구조와 재실자의 밀도 및 이동량에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.05). 본 연구의 측정결과를 종합했을 때, 일부 미생물을 제외하곤 개방형>폐쇄형>혼합형의 순으로 실내공기 중 생물학적 오염을 확인하였다.

(2) 시간대에 따른 생물학적 오염현황

시간대에 따른 총 부유세균의 측정결과(GM±GSD)는 Fig. 2와 같이 오전에는 개방형이 445(±1.3)cfu/m³, 폐쇄형이 357(±1.3)cfu/m³, 혼합형이 299(±1.5)cfu/m³ 순이고, 오후에는 개방형이 480(±1.2)cfu/m³, 폐쇄형이 386(±1.1)cfu/m³, 혼합형이 312(±1.3)cfu/m³

m³ 순으로 조사되었다. 오전에 비해 오후가 높은 결과를 보였으나, 일부 미생물을 제외하곤 큰 차이는 없었다. 오전 및 오후의 총 부유세균 결과는 개방형>폐쇄형>혼합형 순으로 높았고, 부유진균의 결과는 오전에 개방형과 폐쇄형이 비슷하였으나 오후는 폐쇄형과 혼합형에서 높아지는 것으로 조사되었다. 하지만 각 사무공간 구조에서 오전과 오후의 생물학적 오염현황은 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(p>0.05).

(3) 위치(층높이)에 따른 생물학적 오염현황

Table 3은 각 사무공간 구조의 위치(층높이)에 따른 미생물 측정결과(GM±GSD)를 나타낸 것이다. 저층의 경우 총 부유세균은 개방형이 574(±1.2)cfu/m³, 폐쇄형이 413(±1.3)cfu/m³, 혼합형이 350(±1.5)cfu/m³ 순으로 개방형이 높게 조사되었다. 부유진균은 개방형이 93(±1.1)cfu/m³, 폐쇄형이 106(±1.0)cfu/m³, 혼합형이 38(±1.2) cfu/m³으로 폐쇄형이 높게 조사되었다(p<0.05). 개방형 구조가 많은 중층의 경우 총 부유세균은 개방형이 415(±1.2)cfu/m³, 폐쇄형이 351(±1.3)cfu/m³, 혼합형이 207(±1.2)cfu/m³ 으로 개방형이 높게 조사되었다(p<0.05). 또한, 부유진균은 개방형 122(±1.2)cfu/m³, 폐쇄형이 60(±1.2)cfu/m³, 혼합형이 28(±1.2)cfu/m³으로 개방형이 높게 조사되었다. 하지만 고층의 경우 총 부유세균은 개방형이 389(±1.4)cfu/m³, 폐쇄형이 330(±1.2)cfu/m³, 혼합형이 460(±1.1)cfu/m³으로 혼합형이 높게 조사되었다. 부유진균은 개방형 45(±1.2)cfu/m³, 폐쇄형이 102(±1.1)cfu/m³, 혼합형이 120(±1.2)cfu/m³으로 혼합형이 높게 조사되었다(p<0.05). 위치(층높이)에 따

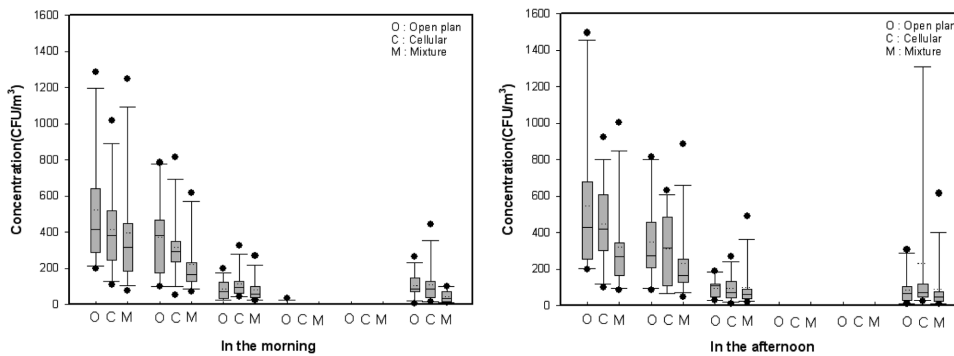


Fig. 2. Mean concentrations of microbiological contaminants during morning and afternoon.

Table 3. Comparison of microbiological contaminants according to the height of floor of general office buildings

	Low floor GM(\pm GSD) ¹⁾			Middle floor GM(\pm GSD)			High floor GM(\pm GSD)		
	Open plan	Cellular	Mixture	Open plan	Cellular	Mixture	Open plan	Cellular	Mixture
TSB (cfu/m ³)	574 (\pm 1.2)	413 (\pm 1.3)	350 (\pm 1.5)	415 (\pm 1.2)*	351 (\pm 1.3)	207 (\pm 1.2)	389 (\pm 1.4)	330 (\pm 1.2)	460 (\pm 1.1)
GPB (cfu/m ³)	411 (\pm 1.3)	267 (\pm 1.2)	233 (\pm 1.23)	209 (\pm 1.5)*	201 (\pm 1.4)	131 (\pm 57)	312 (\pm 1.2)	314 (\pm 1.2)	371 (\pm 1.3)
SA (cfu/m ³)	108 (\pm 1.5)	87 (\pm 1.3)	59 (\pm 1.2)	48 (\pm 1.3)	40 (\pm 1.2)	71 (\pm 53)	80 (\pm 1.4)	145 (\pm 1.3)	190 (\pm 1.5)
Fungi (cfu/m ³)	93 (\pm 1.1)	106 (\pm 1.0)**	38 (\pm 1.2)	122 (\pm 1.2)	60 (\pm 1.2)	28 (\pm 1.2)	45 (\pm 1.2)	102 (\pm 1.1)	120 (\pm 1.2)*
Relative humidity (%)	57.3 \pm 7.4 ²⁾	55.3 \pm 5.4**	58.6 \pm 3.7	57.0 \pm 6.4	49.4 \pm 0.2	60.6 \pm 5.4	61.6 \pm 6.8	60.7 \pm 0.3	59.9 \pm 6.4*
CO ₂ (ppm)	1175 \pm 1036 ²⁾ *	820 \pm 249	644 \pm 85	1321 \pm 955*	672 \pm 59	706 \pm 102	700 \pm 43	714 \pm 87	791 \pm 117

*TSB (Total suspended bacteria), GPB (Gram positive bacteria), SA (*Staphylococcus aureus*)

¹⁾Geometric mean \pm Geometric standard deviation

²⁾Mean \pm Standard deviation

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

른 종합적인 결과는 저층 및 중층에서 총 부유세균은 개방형 > 폐쇄형 > 혼합형 순이었고, 부유진균은 저층이 폐쇄형 > 개방형 > 혼합형, 중층이 개방형 > 폐쇄형 > 혼합형 순으로 조사되었다. 고층의 경우 총 부유세균이 혼합형 > 개방형 > 폐쇄형 순이었고, 부유진균의 경우는 혼합형 > 폐쇄형 > 개방형 순으로 조사되었다. 특히, 고층의 개방형 구조는 저층과 중층의 개방형 구조에 비해 총 부유세균과 부유진균이 낮은 결과로 조사되었지만 통계적 유의성은 없었다($p > 0.05$).

IV. 고찰

1. 오피스 빌딩의 환경적 특성에 대한 고찰

일반적으로 여름철 실내온도는 18~24°C에 해당하는 범위가 적당히 의복을 입은 사람들의 과반수에게 쾌적함을 느끼게 해준다고 알려져 있으나,¹⁶⁾ 본 연구 결과 개방형, 폐쇄형, 혼합형 모두 실내온도는 높게 유지되고 있었다. 이는 2010년 지식경제부에서 공고(公告)한 에너지 절약 대책 중 대형건물 실내온도 26°C 미만의 제한 조치¹⁷⁾가 주원인으로 판단된다. 반면에 상대습도의 경우 폐쇄형이 개방형 구조에 비해 낮게 조사되었고($p < 0.05$), 실내공기 중의 습도는 너무 적으면 호흡기관에 문제를 발생시키며, 반대로 너무 높으면 곰팡이, 진드기, 세균 등의 미

생물 증식을 가져올 수 있다고 보고¹⁸⁾하였다. 이러한 양면성 때문에 이상적인 상대습도 기준은 미국 ASHRAE(American society of heating, refrigerating and air conditioning engineers)의 여름철 적정습도 권고기준인 50~60% 전후의 극히 제한적인 범위를 제안¹⁹⁾하고 있다. 우리나라 기후 특성상 사무실내의 상대습도를 50% 전후로 유지한다는 것은 현실적으로 극히 어려운 문제라고 보고²⁰⁾한 경우도 있었으나, 본 연구 대상 중 2개의 빌딩들을 제외하곤 대다수가 자동공조 제어방식으로 각 구조간의 차이는 있었지만 습도에 대한 빌딩들의 관리는 전체적으로 양호한 수준임을 알 수 있었다.

이산화탄소의 경우 폐쇄형과 혼합형 구조는 일반적인 사무실 내의 농도수준(600~800 ppm)²¹⁾과 유사한 결과로 조사되었으나 개방형 구조는 ASHRAE의 기준¹⁹⁾이 되는 1,000 ppm에 근접할 정도로 높게 나타났다. 레이아웃 형태에 따른 건강각각증상에 대한 연구에서 개방형 구조가 다른 구조에 비해 실내 공기(CO₂) 및 환기가 나쁘다는 응답자가 많다고 보고²²⁾한 바 있으며 본 연구에서도 개방형 구조의 높은 재실율이 1인당 발생(0.31 l/min)²³⁾되는 이산화탄소의 양을 증가시킨 것으로 판단된다. 또한, 사무실 내에 근무하는 근로자당 적절한 실외공기를 공급하면 사무실 공기 중의 이산화탄소 농도를 항상

1,000 ppm 이하로 유지할 수 있다는 의미²⁴⁾로 보아 본 연구에서 일부 오피스 빌딩의 공간대비 낮은 효율의 HVAC의 운영도 다른 구조보다 개방형이 기준치를 초과한 결과라고 도출하였다. 기준치를 초과한 폐쇄형(1개소)의 경우 사무실에서의 전형적인 이산화탄소 농도패턴(오전 11시 및 오후 17시 전후)²⁵⁾과 상반된 결과로 조사되었고, 이는 근무방식(주/야간 교대근무)에 따른 환기시기가 주원인으로 판단된다.

2. 오피스 빌딩의 생물학적 오염에 대한 고찰

본 연구에서는 오피스 빌딩의 사무공간 구조에 따른 생물학적 오염을 시간대(오전 및 오후), 위치(층 높이), 재실율, 환기상태 등에 따라 조사하였다. 조사 대상 오피스 빌딩 15개를 임의로 선정하였기 때문에 실제 연구 시 구조(개방형, 폐쇄형, 혼합형)를 분류하는 것이 매우 어려운 실정이었다. 구조에 따른 재실율의 경우 같은 면적이라면 개방형이 높게 조사되었으나, 본 연구결과 중 동일한 빌딩의 같은 업무 및 용도(동일한 재실율)에서 폐쇄형 400(±1.3)cfu/m³과 비교 시 개방형 802(±1.2)cfu/m³이 총 부유세균은 무려 2배 이상 높게 조사되었다. 이는 개방형 구조의 생물학적 오염을 확인할 수 있는 근거가 되었으나 다른 인자와의 상관관계는 보이지 않았다. 폐쇄형과 혼합형의 경우 총 부유세균과 부유진균을 국내·외 다른 조사결과^{6,11,12,13,14,15)}와 비교하였을 때 유사한 범위였으나 개방형은 높게 유지되는 것으로 나타났다.

실내·외 농도비(I/O ratio)의 경우 ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)에서 실내 대기 중 전체 미생물수는 실외보다 1/3 수준을 유지해야 한다고 추천하고 있으며,²⁶⁾ 실내·외 농도비(I/O ratio)가 1을 초과하면 실내공기의 오염을 의심할 수 있는 것으로 알려져 있다.²⁷⁾ 또한, 실내의 TAB(Total airborne bacteria) 농도가 외부의 TAB 농도보다 훨씬 높다는 보고^{28,29)}를 통해서도 본 연구에서 사무실의 I/O ratio가 실외에서 높게 나타난 것은 생물학적 오염원이 실외보다 사무공간의 구조에 따른 재실자의 밀도 및 행동양상 등의 내부요인과 많은 관련이 있을 것으로 판단된다. 실제로 Bonetta²⁷⁾ 등은 오피스 빌딩에서 인간의 존재로 가장 흔히 발견되는 미생물(44%)이 황색포도상 구균이라고 보고한 바 있어 개방형의 특성(높은 재실율

과 근로자간의 이동량)은 다른 구조에 비해 I/O ratio가 높은 원인으로 판단된다.

최근 한 연구에서도 개방형 구조가 다른 구조에 비해 높은 스트레스와 고혈압, 인플루엔자 바이러스 질병 증가 등의 문제점이 있는 것으로 밝혀진바 있으며,^{30,31)} 본 연구결과 중 개방형 구조의 생물학적 오염이 다른 구조보다 높게 조사된 것도 이를 뒷받침할 수 있는 근거가 될 수 있다. 실제 측정 시에도 개방형 구조의 근로자들은 실내공기에 민감한 반응을 보였고, 공기 정화에 도움이 되는 식물이나 가습기 등의 대체수단을 사용하고 있었다.

시간대에 따른 생물학적 결과에서 실외 결과는 일정한 반면에 실내는 개방형>폐쇄형>혼합형 순으로 오전 대비 오후가 높게 조사되었다. 이는 환기시기 및 횟수와 연관성이 있었다($p < 0.05$). 대다수의 오피스 빌딩이 근로자들의 출근 1-2시간 전에 외부환기를 하고, 점심시간에 다시 외부환기를 실시하였다. 사무실의 재실자 수와 체적도 환기효율성을 결정하는 영향인자로 작용할 수 있다는 보고¹³⁾는 본 연구에서 개방형의 특성과 일치하는 경향을 보였다.

위치(층 높이)에 따른 결과로는 개방형과 폐쇄형이 조성되어 있는 저층 및 중층이 생물학적 오염은 높았다. 또한, 폐쇄형의 상대습도가 다른 구조보다 전체적으로 낮게 조사되었으나, 저층(습도; 55.3%) 및 고층(습도; 60.7%)에서 부유진균의 결과는 높게 조사되었다($p < 0.05$). 이는 다수의 빌딩이 개방형은 중층(습도; 49.4%)에 설계되어 있었고, 폐쇄형의 경우 주로 저층이나 지하에 위치하여 부유진균의 경우 지하에 위치한 사무실에서 지상보다 유의하게 높은 것으로 분석되었다고 보고¹³⁾하였다. 부유진균의 서식 조건이 지상보다 지하조건에서 더 유리함을 의미하고, 좋은 성장조건 중 높은 상대습도와 수분 함유량이 성장을 촉진 한다²¹⁾는 보고와 일치하는 결과를 보였다. 고층의 경우는 혼합형에서 높은 생물학적 오염을 보였다. 이는 다수의 빌딩이 고층에 회의실(혼합형)과 CEO공간(혼합형 및 폐쇄형)이 많이 배치되어 있고, 일부 빌딩의 경우는 고층만 독립된 공조시스템을 운영하는 것도 원인으로 판단된다.

3. 오피스 빌딩의 사무공간 구조에 대한 고찰

사무공간이 생기던 초기에는 건물 재료의 제한으로 폐쇄형 사무공간이 사무실의 형태일 수밖에 없었

다. 이후 1960~70년대에 공간의 유연성과 경제성으로 인하여 세계적으로 많은 사무실에서 오피스 랜드스케이프 즉, 개방형 사무공간이 탄생³²⁾하였다. 하지만 근로자들의 프라이버시와 소음 등으로 인해 개인의 생산성 저하와 높은 이직률의 문제가 나타나 1980년대 연구자나 관리자 등의 지식근로자들(knowledge workers)이 많이 근무하는 회사들은 다시 폐쇄형 사무공간으로 돌아갔다.³¹⁾ 그러나 1997년 미국과 캐나다의 사무실 유형을 조사한 결과, 개방형 58%, 폐쇄형 36%, 혼합형 6%로 여전히 북미의 약 60% 이상은 개방형 사무공간을 채택하고 있는 것으로 보고³²⁾한 바 있다. 개방형 사무공간의 다양한 문제점에도 불구하고 많은 기업들이 채택하고 있는 이유는 사무공간의 경제성과 관리의 편의성, 생산성 향상 등을 들 수 있다. 그러나 이후 문제점이 제기되면서 일부 기업에서는 업무 특성에 맞는 사무공간을 조성하는 등 해결책을 찾고 있다. 본 연구결과 대다수의 오피스 빌딩은 개방형 사무공간(70% 이상)으로 운영하고 있었다. 최근 연구에서 기존에 나온 관련 연구들을 종합 검토하는 방식으로 집계한 결과 개방형 사무공간의 경우 폐쇄형보다 90%의 신체적 및 정신적 건강에 악영향을 끼친다고 보고¹⁰⁾하고 있다. 또한, 시끄럽고 개인 공간이 부족한 개방형 사무실은 직원들의 스트레스와 혈압을 높이고 직원 간의 갈등을 유발하며 이에 따른 이직률도 높은 것으로 나타났다. 폐쇄형에 비해 오히려 집중력과 생산성을 떨어뜨리며, 좁은 공간에 많은 직원이 일하는 환경은 병원균도 빨리 전파시켜 유행성 감기에도 보다 잘 걸리게 된다고 보고¹⁰⁾하였다. 이는 환기율과 재실율이 동일 조건이라면 개방형은 다른 사무공간 구조보다 실내공기 오염이 심각할 것으로 예상할 수 있다.

본 연구에서는 사무공간 구조에 따른 업무 생산성 및 효율성에 초점을 맞춘 대부분의 기존 연구에서 벗어나 환경보건학적인 관점에서 접근하였다. 특히, 오피스 빌딩의 특징인 밀폐형에서 실내공기질은 근로자들에게 중요한 요인이다. 쾌적한 사무실 실내 환경 조성은 근로자들의 건강장해를 예방하기 위한 목적도 있지만, 회사 생산성을 높여 경쟁력을 확보한다는 차원에서 중요하다. 국내·외 오피스 빌딩의 생물학적 오염을 조사한 연구^{6,11-15)}는 일부 보고되었지만, 계절적인 요인, 온도와 습도의 조건별 특성, 건축자재의 오염물질 방출특성과 실내공간에 미치는

영향, 실내공간면적 및 지역차이에 의한 영향, 층별 환기량 등을 고려한 연구가 대부분이다. 물론, 본 연구는 서로 다른 구조에서 근무하는 근로자들의 실내 공기오염 인식 및 증후군에 대한 자기기입식 설문조사를 병행하지 못한 것은 아쉬운 부분으로 생각한다. 그러나 국내·외 연구 중 오피스 빌딩의 사무공간 구조에 따른 실내공기에서 생물학적 오염원을 조사한 연구는 현재로서 거의 없는 실정이고, 최근 보고된 개방형 사무공간의 문제점을 더욱 뒷받침 할 수 있는 근거자료가 될 수 있다. 또한, 노동부의 『산업안전보건법에 의한 사무실 공기관리 지침』에서 생물학적 오염원에 대한 다양한 관리항목이 확대 및 추가될 수 있을 것으로 생각된다.

V. 결 론

이 연구는 서울시내에 소재하고 있는 15개의 오피스 빌딩을 대상으로 사무공간 구조(개방형, 폐쇄형, 혼합형)에 따른 환경적인 인자와 실내공기 중 생물학적 오염현황을 조사하였다. 연구의 수행을 통해 조사된 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 실내온도는 개방형 $25.6 \pm 1.0^\circ\text{C}$, 폐쇄형 $25.9 \pm 1.1^\circ\text{C}$, 혼합형 $25.3 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 에서 유사한 결과를 나타내었으며, 상대습도의 경우 개방형 $58.9 \pm 7.0\%$, 폐쇄형 $55.2 \pm 7.0\%$ 에서 구조 간에 유의한 차이를 보였다 ($p < 0.05$).

2. 이산화탄소 농도는 개방형 913 ± 120 ppm, 폐쇄형 750 ± 118 ppm, 혼합형 724 ± 113 ppm 순이었다. 또한, 조사 대상 중 개방형 3개소, 폐쇄형 1개소가 실내공기 기준치(1,000 ppm)를 초과하였다.

3. 사무공간 구조에 따른 생물학적 오염원 중 총 부유세균($\text{GM} \pm \text{GSD}$)은 개방형 $452 (\pm 1.3) \text{cfu/m}^3 >$ 폐쇄형 $366 (\pm 1.3) \text{cfu/m}^3 > 287 (\pm 1.5) \text{cfu/m}^3$ 순으로 조사되었으며, 세 그룹 간에 통계적으로 유의한 차이를 보였다 ($p < 0.05$). 부유진균은 폐쇄형 $128 (\pm 1.0) \text{cfu/m}^3 >$ 개방형 $70 (\pm 1.0) \text{cfu/m}^3 >$ 혼합형 $43 (\pm 1.0) \text{cfu/m}^3$ 순으로 조사되었다 ($p < 0.05$).

4. 사무공간 구조에 따른 실내·외 생물학적 오염농도 비율(I/O ratio)은 개방형 구조가 높은 것으로 조사되었다. 빌딩 위치(층높이)에 따른 결과는 저층 및 중층에서 개방형 구조가 고층에서 혼합형 구조가 높은 생물학적 오염이 조사되었다.

감사의 글

본 연구는 (주)GS건설의 지원을 받아 수행된 연구 결과의 일부로 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- National Academy of Sciences (NAS), Human exposure assessment for airborne pollutants. Washington DC; 1993.
- Robinson J, Nelson WC. National human activity pattern survey data base. US EPA, Research triangle park, NC; 1995.
- World Health Organization (WHO). Air quality guidelines for Europe, 2nd ed. Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe. WHO Regional Publications, European Series, No. 91; 2000.
- Woods JE, Cone JE, Hodgson MJ. Problem building; building associated illness and sick building syndrome. *Med State Art Rev*, 1989; 4: 753-770.
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). *Indoor Air Quality*. 2001; 59: 15968-16039.
- Roh YM, Lee CM, Kim SW, Kim CN, Kim HW, Cho KH, Choi HC, Kang JH, Kim JM. A study on the characteristics of indoor air quality in office and subjective symptoms of office workers. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*. 2004; 14(3): 270-282.
- Lee CM, Kim YS, Kim KY, Kim JC, Jeon HJ. Trend of study on suspended microorganism in Korea. *Korean Society for Indoor Environment*. 2007; 4(1): 59-71.
- Miller SYS, Cheng JM. Macher guest editorial. *Aerosol Sci. Technol*. 1999; 30: 93-99.
- Bernstein RS, Sorenson D, Garabrant C, Reaux Treitman RD, Exposures to respirable, airborne penicillium from contaminated ventilation system, clinical, environmental and epidemiological aspects, *Am Ind Hyg Assoc J*. 1983; 44: 161.
- Oommen VG, Knowles M, Zhao I. Should health service managers embrace open plan work environments? a review. *Asia Pacific Journal of Health Management*, 2008; 3(2): 37-43.
- Kim YS, Lee EG, Yip MJ, Kim KY. Distribution and classification of indoor concentration of microorganisms in public buildings. *Kor J Env Hlth. Soc*. 2002; 28(1): 85-92.
- Lee CM, Kim YS, Lee TH, Park WS, Hong SC. Characterization of airborne bioaerosol concentration in public facilities. *J Environ Sci*. 2004; 13(3): 215-222.
- Kim KY, Roh YM, Kim YS, Lee CM, Sim IS. Profile of airborne microorganisms distributed in general offices. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*. 2008; 18(1): 11-19.
- Tsai FC, Macher JM. Concentrations of airborne culturable bacteria in 100 large US office buildings from the BASE study. *Indoor Air*. 2005; 15(9): 71-81.
- Sessa R, Di PM, Schiavoni G, Santino I, Altieri A, Pinelli S, Del PM. Microbiological indoor air quality in healthy buildings. *New Microbiol*. 2002; 25(1): 51-56.
- Keum JS, Kim YS, Kim JD. Air Conditioning. Taehoon Publisher. 2000; 22.
- Ministry of knowledge economy, Revising the energy utilization act. Paragraph 2 of Article 7 No. 9, 2010.
- Ikeda K. Indoor air pollution causes and countermeasures. Sudopremium engineering Publisher; 2004. p.15-86.
- American society of refrigerating and air conditioning engineers (ASHRAE). Thermal environment conditions for human occupancy. Atlanta, ASHRAE, Inc; 1992.
- Jeong JY, Lee BK, Phee YG. Assessment of indoor air quality in commercial office buildings. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*. 2007; 17(1): 31-42.
- Jeong JY, Lee KY, Lee BK, Phee YG. Office air quality assessment and management standards development (I). The Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA); 2004.
- Lee KH, JO YJ, HA MK. Affect of indoor environment on worker's health in office buildings-focusing on self-reported health symptoms of workers -. *The Architectural Institute of Korea*, 2006; 22(12): 37-44.
- Erdmann CA, Steiner KC, Apte MG. Indoor carbon dioxide concentrations and sick building syndrome symptoms in the base study. *Indoor Air J USA*, 2002.
- Nevalainen A, Hyvarinen A, Pasanen A, Reponen T. Fungi and bacteria in normal and mouldy dwellings. In: Samson, R.A., Flannigan, B., Flannigan ME, Verhoeff AP, Adan OCG, Hoekstra ES (Eds.), *Health Implications of Fungi in Indoor Environments*. 1994; 155-162.
- ASHRAE 62-2001, Handbook-HVAC application. Atlanta, ASHRAE Inc.; 2003.
- Morey PJ, Otten HB. Airborne viable microorgan-

- ism in office environments sampling protocol and analytical procedures. *Appl Ind Hyg*. 1986; 1(1): 19.
27. Bonetta S, Bonetta S, Mosso S, Samp S, Carraro E. Assessment of microbiological indoor air quality in an Italian office building equipped with an HVAC system. *Environ Monit Assess*. 2010; 161: 473-483.
28. Hwang SH, Yoo KN, Park JH, Park DU, Yoon CS. Exposure level of airborne bacteria in the university laboratories in seoul, Korea. *Kor J Env Hlth*. 2009; 35(5): 355-361.
29. Hwang SH, Park DU, Ha KC, Cho HW, Yoon CS. Airborne bacteria concentrations and related factors at university laboratories, hospital diagnostic laboratories and a biowaste site. *J Clin Pathol*. 2011; 64(3): 264-264.
30. Myatt TA, Johnston SL, Zuo Z, Wand M, Kebabze T, Rudnick S, et al. Detection of airborne rhinovirus and its relation to outdoor air supply in office environments. *Am J Respir Crit Care Med*. 2004; 169(11): 1187-1190.
31. Yoon HK, Park HS. Analyzing the state of the art office planning directions in north america for better productivity. *Journal of the Korean Institute of Interior Design*, 2010; 19(1): 78.
32. International Facility Management Association, Research Report #18: Benchmarks III; 1997.