

도심지 겨울철 토지피복 유형별 바이오에어로졸 중 배양성 세균 분포^{1a}

김정호^{2*} · 윤용한² · 김학기³ · 이명훈⁴ · 박영진⁵ · 이동재⁶ · 신용진⁷

Distribution of Culturable Bacteria of Bioaerosol according to Land Type in Winter in the City Center^{1a}

Jeong-Ho Kim^{2*}, Yong-Han Yun², Hak-Gi Kim³, Myeong-Hun Lee⁴, Yeong-jin Park⁵, Dong-Jae Lee⁶, Yong-jin Sin⁷

요약

본 연구에서는 토지피복유형에 따른 바이오에어로졸 중 배양성 세균분포를 파악하기 위하여 충청북도 충주시에 위치한 3가지 유형을 대상으로 실시하였다. 토지피복에 따른 기상요소와 바이오에어로졸을 조사하여 측정지점별 미기상변화에 따른 세균 분포를 비교·분석할 수 있었다. 측정지점별 미기상 중 기온의 차이는 도시 숲 8.7℃, 수변 녹지 10.8℃, 도심지 10.2℃로 측정지점 중 도시 숲이 가장 낮은 기온 값을 보였으며, 상대습도는 도시 숲 61.8%, 수변 녹지 59.3%, 도심지 55.7%로 도시 숲이 가장 높은 것으로 분석되었다. 동정된 세균은 43속 99종으로 나타났다. 배양된 세균의 종 다양성 측면에서는 수변녹지 22속, 도시 숲 21속, 도심지 17속으로 조사되었으며, 종수의 경우 수변녹지 37종, 도심지 31종, 도시 숲 31종으로 나타났다. 3가지 유형의 측정지에 모두 존재하는 종은 *Bacillus toyonensis*와 *Pseudarthrobacter oxydan*으로 나타났으며, 또한 도시 숲과 수변녹지와 같은 녹지지역에서 존재하는 *Herbiconiux flava*종을 확인하였다. 측정지점별 미기상환경에 따른 세균농도의 변화를 분석한 결과 도시 숲 333CFU/m³, 수변 녹지 287CFU/m³, 도심지 173CFU/m³ 순으로 나타났으며, 미기상 중 기온변화에 따른 측정지점별 농도변화는 미비하였다. 그러나 상대습도와 풍속은 농도변화와 유사한 경향을 보인 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 토지피복유형에 따른 바이오에어로졸 중 배양성 세균의 분포 정도를 파악하여 측정지점별 바이오에어로졸의 특성을 비교·분석하여 추후 건강한 도시 관리 및 녹지조성의 기초자료를 제공하고자 하였다.

주요어: 도시 숲, 수변 녹지, 도시, 건강관리, 미기상

1 접수 2021년 10월 20일, 수정 (1차: 2021년 11월 12일, 2차: 2021년 11월 19일), 게재확정 2021년 11월 23일

Received 20 October 2021; Revised (1st: 12 November 2021, 2nd: 19 November 2021); Accepted 23 November 2021

2 건국대학교 녹색기술융합학과 교수 Dept. of Green Technology Convergence, Konkuk Univ., 268, Chungwon-daero, Chungju-si, Chungcheongbuk-do, 27478, Korea

3 유한회사 엘에스디 대표이사 Sagimakgol-ro, Jungwon-gu, Seongnam-si, Gyonggi-do, Korea (2581890@gmail.com)

4 당진시청 산림녹지과 Dangjin City Hall, 1 Sicheong 1-ro, Dangjin-si, Chungcheongnam-do, Korea (leehun0324@korea.kr)

5 건국대학교 녹색기술융합학과 교수 Dept. of Department of Medicinal Biosciences, College of Health and Biomedical Science, Konkuk Univ., 268, Chungwon-daero, Chungju-si, Chungcheongbuk-do, 27478, Korea (yjpark@kku.ac.kr)

6 건국대학교 대학원 녹색기술융합학과 석사과정 Dept. of Green Technology Convergence, Konkuk Univ., 268, Chungwon-daero, Chungju-si, Chungcheongbuk-do, 27478, Korea (dongjai8082@naver.com)

7 건국대학교 대학원 녹색기술융합학과 석사과정 Dept. of Green Technology Convergence, Konkuk Univ., 268, Chungwon-daero, Chungju-si, Chungcheongbuk-do, 27478, Korea (tlsdydwl17@naver.com)

a 이 논문은 2021년도 건국대학교 KU학술연구비 지원에 의한 결과임.

* 교신저자 Corresponding author: hoyal209@kku.ac.kr

ABSTRACT

This study surveyed three land cover types in Chungju City in Chungcheongbuk Province to check the distribution of cultured bacteria in bio-aerosols according to land cover type. It was possible to compare and analyze the distribution of bacteria according to microclimatic changes at each measurement point by examining meteorological factors and bio-aerosols according to land cover. The microclimate temperature in each measurement point was 8.7°C for the urban forest, 10.8°C for the waterside green area, and 10.2°C for the urban area, indicating the urban forest had the lowest temperature among the measurement points. The relative humidity was 61.8% in the urban forest, 59.3% in the waterside green area, and 55.7% in the urban area, indicating that the urban forest was the most humid among the measurement points. The identified bacteria were found to be 43 genera and 99 species. In terms of species diversity of cultured bacteria, 22 genera were found in the waterside green area, 21 genera in the urban forest, and 17 genera in the urban area, 37 species were found in the waterside green area, 31 species in the urban area, and 31 species in the urban forest. *Bacillus toyonensis* and *Pseudarthrobacter oxydan* were the species present in all three types of measurement sites, and *Herbiconiux flava* was confirmed to inhabit green areas such as urban forests and waterside green areas. The analysis result of the bacterial concentration according to the microclimatic environment in each measurement point was 333 CFU/m³ in the urban forest, 287 CFU/m³, in the waterside green area, and 173 CFU/m³ in the downtown area. The relative humidity and wind speed were analyzed to show a similar trend as the concentration. This study is expected to provide basic data for healthy urban management and green area creation by identifying the distribution of cultured bacteria in bio-aerosols according to land cover type and comparing and analyzing the traits of bio-aerosol in each measurement point.

KEY WORDS: URBAN FOREST, WATERSIDE GREENERY, DOWNTOWN, HEALTHCARE, MICRO CLIMATE

서론

최근 인간의 주거형태 변화는 인구 과밀화로 발전하여 도시화의 확장으로 이어지며, 토지이용 및 토지피복을 변화시켜 미세먼지, 스모그현상과 같은 대기오염을 초래한다. 이러한 대기오염은 인간의 생활환경 중 가장 밀접한 관계를 가지며, 호흡기 질환, 피부질환 등 인간에게 직접적인 건강상의 문제를 일으킨다. 일반적으로 대도시와 인근 지역과 비교할 때, 평균적으로 기온의 경우 1~3°C, 오염물질 배출은 5~25배 정도 높은 결과를 보인 것으로 연구되었다(Yun and Lee, 2014). 이처럼 인간은 대기환경과 밀접한 관계를 가지며, 일생동안 약 50억 리터 정도의 공기를 이용하는데 그 내부에 미생물 및 먼지와 같은 입자들이 포함되어 있다(Lee et al., 2015).

도시화로 인한 오염물질 중 하나인 바이오에어로졸은 생물체 자체, 생물체의 유기체가 생산해내는 독소·분비물 또는 그 사체 등이 포함된 입자(particle) 들이나 또는 배양은 되지 않고 인체에 민감한 반응을 주는 것 등이 대기 중에

부유한 상태에서 인체에 흡수 또는 침투하여 건강장애를 발생시킬 수 있는 모든 요인을 통칭하며(Lee et al., 2004), 바이러스, 박테리아, 곰팡이 등 모두 포함되는 포괄적인 개념이다. 바이오에어로졸은 생물 다양성과 같은 긍정적인 측면도 보고되고 있으나, 인간의 활동에 제한을 주고 면역력 저하, 호흡기 질환의 원인으로 작용하는 등 다양한 부정적 측면 또한 존재한다(Fung and Hughson 2003, Park et al., 2010). 이러한 문제들은 도시지역에 주거하는 시민들에게 감염성 질환, 알레르기, 호흡기 질환, 암 등의 질병이 지속적으로 심화됨에 따라 이에 대한 관심이 집중되고 있는 실정이다(Douwes et al., 2003, Ha and Back, 1991a). 2009년 인플루엔자(H1N1) 전염병기간 동안 멕시코에서 가장 많은 여행객을 받는 국가의 경우 이용자의 이용형태에 따라 바이러스의 침입 위험성이 상당히 높았으며(Coleman et al., 2018a), 이는 유입과 이동이 빈번히 이루어지는 도시지역의 경우 피해는 심각할 수 있다. 바이러스에 대한 원인 규명과 대응은 신속하고 확실하게 이루어져야 하는 중요한 과제이다. 이처럼 바이오에어로졸은 인간의 생활환경과 밀접한 관

계가 있으며, 인간의 활동과 대기 흐름의 변화에 따라 이동과 확산이 자유로워 건강과 일상생활에 많은 영향을 미친다. 하지만, 대기 자체가 바이오에어로졸 중 미생물이 성장할 수 있는 환경은 아니며, 대기 중에 있는 대부분의 미생물은 토양, 식물, 동물, 사람을 통해 방출되어 진다. 또한, 실내외 환경에 모두 존재하지만, 주변환경의 차이와 계절 변화에 따라 바이오에어로졸의 농도 변화는 다소 차이가 있다 (Karotki *et al.*, 2015a). 환경부는 2004년 실내공기질 업무편람에서는 총 부유세균 기준을 다중이용시설과 학교기질을 800CFU/m³으로 기준하였다. 그러나 실외환경의 경우 기준이 명확하게 구분되지 않으며, 인간의 생활환경의 90% 이상을 실내공간에 집중되어 있어 상대적으로 노출되는 시간이 낮은 실외환경에 대한 관심은 실내환경에 비해 전무한 실정이다 (Park and Kim, 2009a). 도시지역의 실외환경에 대한 바이오에어로졸의 증가는 실내환경과 인간의 생활환경에 직접적인 영향을 끼치며, 녹지의 존재는 바이오에어로졸의 긍정적인 차이로 이어질 수 있다 (Song *et al.*, 2015).

기존 바이오에어로졸 연구는 노인의 심혈관 및 호흡기에 미치는 영향에 대한 연구 (Karotki *et al.*, 2015b)와 도시에 존재하는 하수처리장으로 인한 바이오에어로졸 내 병원성 의심 박테리아에 대한 연구 (Yoo *et al.*, 2015) 같은 인간의 건강에 대한 연구와 병원, 가정과 같은 실내 대기질의 평가 (Ha and Back, 1991b), 실내 온·습도 변화에 따른 바이오에어로졸의 변화 (Park and Kim, 2009b) 등 주로 실내환경에 대한 연구가 진행되었으며, 실외환경에 대한 연구로는 대중교통을 통한 바이오에어로졸의 연구 (Coleman *et al.*, 2018b), 황사 등으로 인한 바이오에어로졸에 대한 연구 (Go *et al.*, 2012) 등이 이루어졌다. 반면 토지피복유형을 고려하여 비교·분석한 연구는 미비한 실정이었다.

따라서 본 연구에서는 실외환경을 중점적으로 고려한 토지피복유형에 따른 바이오에어로졸 중 배양성 세균의 분포 정도를 파악하여 토지피복유형별 바이오에어로졸의 특성을 비교 분석하였다. 추후 도시지역 토지피복유형별 바이오에어로졸 중 배양성 세균의 분포 특성을 파악하여 건강한 도시 관리 및 녹지조성의 기초자료 제공을 목적으로 하였다.

연구방법

1. 연구대상지

토지피복유형별 바이오에어로졸 중 배양성 세균을 조사하기 위하여 실시하였으며, 토지피복에 따른 기상환경 및 바이오에어로졸 측정을 목적으로 실시하였다. 실외 미생물의 변화와 분포에 미치는 영향은 큰 범주에서 시간, 공간,

주변환경, 기상학적 조건에 의해서 많은 영향을 받는 것으로 보고되고 있으며, 황사 및 먼지를 통한 미생물의 장거리 이동에 대한 연구결과 (Griffin, 2007, Ichinose *et al.*, 2008)를 참고하여 진행하였다.

연구대상지 선정은 생태적으로 동일한 영향을 받는 유역권 내에서 다음과 같이 외부환경의 유입이 비교적 낮은 겨울철을 선택하였으며, 첫째, 토지피복과 녹지·나지의 비율이 상이한 지점. 둘째, 이용 및 주변 환경이 상이한 지점. 셋째, 동일한 시간대에 측정이 가능한 지점을 고려하여 선정하였다. 연구대상지는 충청북도 충주시 내의 토지피복이 다른 3가지의 유형으로 구분하여 도시 숲, 수변녹지, 도심지로 지정하여 진행하였다. 조사시기는 2019년 12월 8일 ~ 2019년 12월 12일까지 총 5일을 실시하였으며, 측정시간대의 경우 기온이 높아지는 정오를 기준으로 12:00 ~ 13:00까지 진행하였다. 바이오에어로졸의 경우 공기 포집량을 50L로 지정하여 측정지점별 5번 반복하여 유전자증폭과정을 수행한 후 전기영동과정을 통하여 밴드가 양호하게 형성된 조사일의 바이오에어로졸을 분석하였다.

도시 숲은 충주 충주시 칠금동에 위치한 탄금대, 수변녹지는 호암동에 위치한 호암지생태공원, 도심지는 성서동에 위치한 젊음의 거리를 선정하였다. 더불어 측정지점 주변 50m의 방형구를 조사하여 인접 환경으로부터 받을 수 있는 영향을 조사하였으며, 유형별 토지이용, 토지피복, 식생유형, 울폐도 등 환경적 요소와 기상환경요소인 기온, 상대습도, 풍속을 조사하였다. 아래의 Table 1과 같이 도시 숲의 경우 이용자의 보행로 및 인접도로와 탄금대 주차장까지의 연결도로를 제외한 모든 지역이 녹지로 이루어진 산림으로서 녹지와 나지의 비율은 녹지(85%), 나지(15%)에 해당하였으며, 토지이용은 자연녹지에 해당하였다. 도심 숲의 식생 유형은 소나무, 리기다소나무, 아까시나무, 신갈나무 및 굴참나무와 같은 참나무류로 확인되었다. 식생구조로는 단층구조로서 소나무가 우점한 지역으로 하부식생은 토양이 노출된 나지 형태, 울폐도는 70%로 조사되었다.

수변녹지의 경우 인공저수지를 포함한 공원으로서 자연환경이 양호하여 동·식물의 우수한 서식처로의 역할을 수행하는 환경적 가치가 우수한 지역이다. Table 1과 같이 토지이용은 도시 숲과 동일한 자연녹지지역으로 구분되며, 식생 유형으로는 느티나무, 소나무, 신갈나무 등으로 다양한 식생이 확인되었다. 측정지점 주변 50m 방형구 조사결과 녹지와 나지의 비율은 수변지역(30%), 녹지(45%), 나지(25%)로 조사되었으며, 울폐도의 경우 산책로 조성으로 인해 낮은 20%로 조사되었다.

마지막으로 도심지는 Table 1과 같이 토지이용은 일반상업지역으로 구분되었으며, 영화관, 쇼핑몰, 음식점, 주거단지 등이 집약적으로 모여 있는 지역으로서 이용형태와 빈도

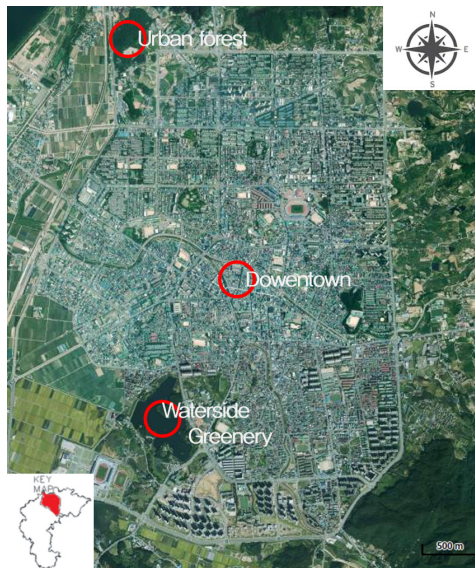


Figure 1. Research site.

가 타 측정지점에 비해 현저히 높고 차량 통행량 또한 높은 지역으로 대부분 모든 부분 인공건축물과 같은 불투수포장 면적으로 구성되었다. 측정지점의 모든 부분 인공건축물 및 불투수포장 면적으로 구성되었다. 측정지점은 사람의 유동이 가장 많은 영화관 앞 사거리에서 진행하였으며, 울폐도는 0%로 식생이 전혀 없는 지점에서 측정을 진행하였다. 측정지점 주변 50m 방형구 조사결과 녹지와 비녹지의 비율은 나지(100%)로 조사되었다. 이처럼 형태와 특성이 다른 3가지의 유형을 대상으로 선정하여 연구에 반영하고자 하였다.

2. 조사분석

1) 기상측정방법

대상지가 위치한 충주시의 기상환경을 파악하기 위하여 기상청 홈페이지를 통한 종합 기상환경을 분석하였다. 기상 변화의 차이를 조사하기 위하여 도시 숲, 수변녹지, 도심지 3가지의 토지피복별 기온, 상대습도, 풍속을 비교적 기온이 높아지는 정오를 기준으로 12:00~13:00까지 TSI열선풍속계를 통하여 3반복 측정하여 미기상환경을 확인하였으며, 측정 지점의 경우 지표면에서 방사되는 복사의 영향을 최소화하기 위하여 지상으로부터 1.5m 지점에서 측정을 진행하였다.

2) 세균농도계산

대상지의 토지피복유형별 바이오에어로졸 중 배양성 세균의 농도의 차이를 확인하기 위하여 MirroBio MB1 Bionasol Sampler을 통하여 포집량을 50L로 지정하여 대기 중의 미

Table 1. Measuring point status

Type	Green area ratio (%)	Crown density (%)
Urban forest	85	70
Waterside greenery	45	20
Downtown	-	-

생물을 측정지점별 5번 반복하여 포집하였다. 포집된 미생물을 토지피복유형별로 구분하여 25℃의 인큐베이터에서 24~48시간 배양 후 배양된 세균에 한해서 1차 육안확인을 통하여 집락의 수를 기록하고 기록된 집락을 96well에 접종하여 2차 배양하였다. 2차 배양 또한 1차 배양과 동일한 조건에서 배양하였으며, 배양된 세균을 PCR작업을 통하여 16s rRNA을 2차 확인을 통하여 세균인 것으로 확인되었다. 측정된 plate 내의 확인된 세균의 집락수의 농도를 알아보기 위하여 아래의 식에 대입하여 CFU/m³으로 산출하여 대상지의 유형별 농도차이를 확인하였다.

$$CFU/m^3 = 1000 \cdot \frac{n_c}{V_s}$$

n_c = 집락의 수 V_s = 포집된 공기의 량

3) 세균동정·과정

미생물을 배양한 각 plate에서 형태(색, 모양, 광택, 투명도 등)가 다르다고 판단되는 집락을 PCB(Plate count broth) 200 μ l에 접종하였으며, 배양된 미생물을 이용하여 16s rRNA 유전자를 증폭하기 위한 주형으로 사용하였다. 미생물의 16s rRNA유전자 증폭을 위해 주형 3 μ l, 16s forward primer (5'-CCGCGACTACCAGGGTACTAA-3'), 16s reverse primer (5'-GCCGCTGCAGAGTTTGATCCRGGCTAG-3') 각 10pmol 1 μ l, 증류수 5 μ l, 그리고 Anti HS Taq PreMix (2X) (TNT Reasearch. LTD., Korea) 를 첨가하여 총 20 μ l 로 수행하였다. PCR 조건은 95℃ 10분 반응 후, 95℃ 30초, 55℃ 30초, 72℃ 1분을 30회 반복한 뒤, 72℃에서 10분 동안 종결 반응을 수행하였다. PCR 산물은 1.5%(w/v)

agarose gel(YoungSciences, Korea)에서 전기영동을 수행한 후, ethidium bromide 용액에서 염색하여 증폭결과를 확인하였다. 증폭한 PCR 산물을 정제하기 위해 증류수를 이용하여 최종 용량이 100 μ l로 마치고난 뒤, 100% ethanol 250 μ l, 3M Sodium acetate buffer (pH5.2) (Tech& Innovation, Korea) 10 μ l를 첨가하여 invert하여 완전히 혼합되도록하고 -70 $^{\circ}$ C 초저온냉동고에서 30분 반응하였다. 반응한 시료를 13,000rpm에서 30분간 원심분리 하였으며 그 후 상층액을 제거하고 실온에서 건조하였다. 건조된 시료는 증류수 11 μ l를 첨가하여 녹인 뒤, 1.5%(w/v) agarosegel에서 전기영동을 수행한 후, ethidium bromide 용액에서 염색하여 정제결과를 확인하였다. 밴드가 형성된 산물들은 16s forward primer를 이용하여 단방향으로 분석하기 위한 바이오니아(Bioneer, Korea)에 의뢰하여 염기서열을 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 토지피복 유형별 기상환경

1) 총주 기상특성

본 연구에서는 Figure 2와 같이 충청북도 충주시의 최근 10년간의 전반적인 기상환경을 파악하였다. 최근 10년 겨울철 중 기온이 가장 낮은 연도는 2012년 -4.9 $^{\circ}$ C로 나타났으며, 가장 높은 기온을 보인 연도는 2015년으로 1.2 $^{\circ}$ C로 조사되었다. 상대습도의 경우 가장 낮은 연도는 2017년으로 59.9%였으며, 가장 높은 연도는 본 연구가 진행된 2019년으로 75%로 조사되었다. 연구가 진행된 2019년은 최근 10년 중 비교적 온화한 겨울철의 기온에 속하며, 평균기온은 -0.1 $^{\circ}$ C로 조사되었다. Figure 3과 같이 2019년 12월 08일 ~ 12월 12일까지 총 5일간 충주시의 일별 기상환경변화

를 파악하였다. 측정시기의 경우 기온변화의 폭이 비교적 낮은 10일과 11일을 중점적으로 전·후 측정을 진행하였다. 기온변화는 08일을 시작으로 시간이 경과함에 따라 점차 증가하는 경향을 보였으며, 11일 이후 시간이 지남에 따라 급격하게 낮아지는 경향을 확인하였다. 08일 -3.2 $^{\circ}$ C로 측정일 중 가장 낮은 평균기온을 보였으며, 11일 3.6 $^{\circ}$ C로 가장 높은 평균기온을 확인하였다. 상대습도는 12일 57%로 가장 낮은 값을 보였으며, 10일 87%로 측정일 중 가장 높은 상대습도를 기록하였다.

2) 측정지점별 미기상특성

측정지점별 토지피복유형에 따른 기상환경 차이를 확인하기 위하여 TSI열선풍속계를 통하여 미기상요소를 12:00 ~ 13:00까지 1분 반복측정하여 평균값을 도출하였다. 측정지점별 기온은 아래 Figure 4와 같이 수변 녹지가 10.8 $^{\circ}$ C로 가장 높은 평균값을 보였으며, 도심지 10.2 $^{\circ}$ C, 도시 숲 8.7 $^{\circ}$ C 순으로 나타났다. 이는 연구계절인 겨울철을 고려하였을 때, 도심지의 경우 많은 교통이용과 유동인구의 영향으로 사료되었다. 가장 높은 평균기온값을 보인 수변 녹지와 가장 낮은 평균기온값을 보인 도심지의 차이는 2.1 $^{\circ}$ C로 나타났으며, 이러한 기온의 차이는 도시 숲의 경우 수목으로 인한 울폐도의 영향을 받아 일사량의 저감(Lee and Lyu, 2014)으로 기온이 다른 유형에 비해 낮은 것으로 사료되었다.

평균 상대습도의 경우 기온과 상반된 결과인 도시 숲이 가장 높았으며, 도시 숲이 61.8%, 수변 녹지 59.3%, 도심지가 55.7%로 측정되었다. 도심지의 경우 가장 낮은 상대습도를 보였으며, 이는 구조와 각각의 토지피복현황과 수림형태에 따라 증·발산량 및 일사차폐정도 등의 차이(Yoon and Song, 2002)로 불투수면적과 인공건축물이 가장 많이 차지한 도심지가 유형 중 가장 낮은 평균 상대습도를 보였다.

Figure 5과 같이 측정지점별 평균 풍속의 차이는 도시 숲 0.29m/s, 수변 녹지 0.23m/s, 도심지 0.12m/s로 도시 숲

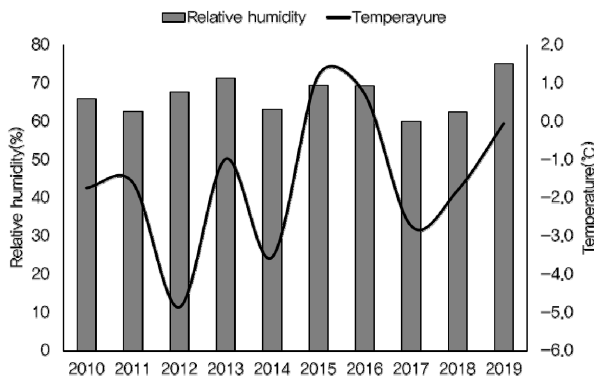


Figure 2. December weather changes in the past 10 years.

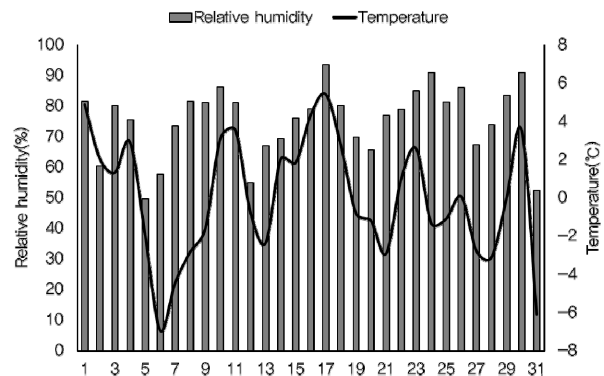


Figure 3. Weather changes in December 2019.

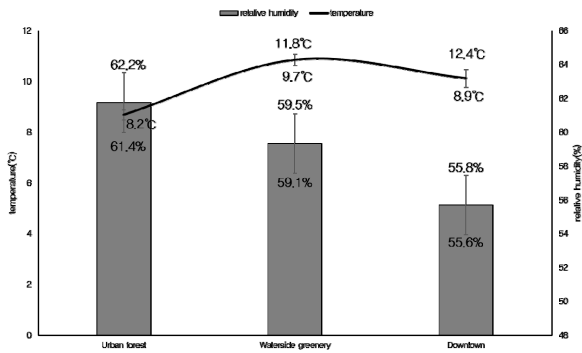


Figure 4. Measuring point micro climate.

이 가장 높았으며 도심지와외의 평균 풍속의 차이는 0.17m/s로 나타났다. 평균 풍속의 경우 도심지는 도시외부에서 유입되는 바람이 건축물 등으로 차단되거나 정체현상이 발생할 수 있는 공간적 특징을 가진 곳(Song and Park, 2013)으로 유형 중 가장 낮은 풍속 값을 보인 것으로 사료되었다.

2. 토지피복유형별 배양성 세균농도 및 동정결과

1) 측정지점별 세균농도 분석

도시 숲의 측정지점에서 조사된 배양성 세균의 농도는 Figure 6과 같이 333CFU/m³으로 나타났다. 이는 환경적 요소와 주변의 산림으로부터 풍향과 풍속의 영향으로 유입될 가능성이 높았으며, 측정지점의 우점수종인 소나무 등 수목의 잎 대기 중의 비산 먼지 등이 중력의 영향을 받아 낙하하여 측정지점별 가장 높은 농도 값을 보인 것으로 사료되었다.

수변 녹지의 측정지점에서 조사된 배양성 세균의 농도는 286CFU/m³으로 나타났다. 이는 하부의 토양 및 하부식생으로부터 비교적 낮은 영향을 받았으며, 인접한 주변 녹지의 영향을 받은 것으로 사료되었다.

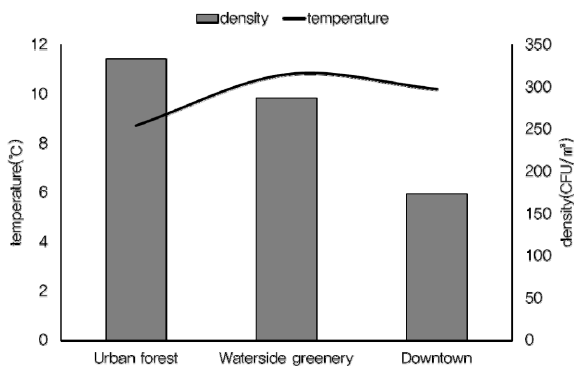


Figure 6. Temperature and density results.

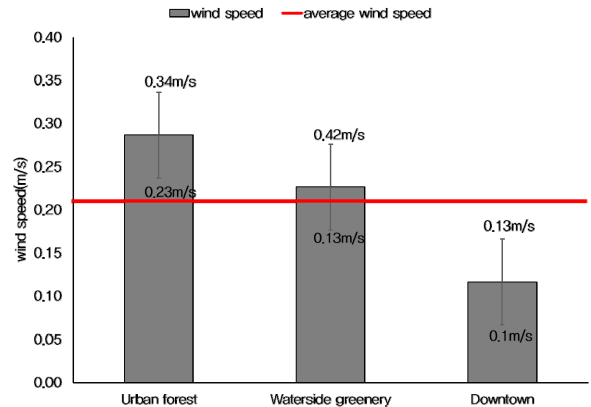


Figure 5. Measuring point wind speed.

도심지의 측정지점에서 조사된 배양성 세균의 농도는 173CFU/m³으로 나타났다. 이는 인공건축물 등 측정지점의 모든 부분 불투수포장으로 구성되어 있어 풍속이 낮고 외부로부터의 공기의 흐름이 원활하게 이용되지 않는 특징으로 측정지점별 가장 낮은 농도 값을 보인 것으로 사료되었다.

위의 결과를 토대로 선행논문과 비교하였을 때 세균의 농도는 계절의 변화함에 따라 농도의 변화는 있지만, 기온의 경우 Figure 6과 같이 겨울철의 농도변화는 미비하였으며, Figure 7 및 Figure 8과 같이 상대습도와 풍속은 유사한 경향을 보인 것으로 분석되었다. 토지피복유형의 경우 유형별 다소 차이가 있으며, 자연환경이 양호하고 식생비율이 높은 도시 숲이 다른 지역에 비해 다소 높은 농도 값을 보인 것으로 분석되었다. 이러한 결과를 해외의 실외농도에 대한 사례와 비교하였을 때 스웨덴 스톡홀름 2~4,000CFU/m³, 남아프리카 요하네스버그 175~8,500CFU/m³, 프랑스 마르세유 50~2,813CFU/m³로 연구되었으며, 국가별 실외 부유세균의 농도 범위의 폭은 크고 차이가 있음을 알 수 있었다. 그러나 세균의 농도가 인체의 유익·유해하다는 명확한 척도는 될수 없으며, 대기 중의 바이오에어로졸에 대한 정보가

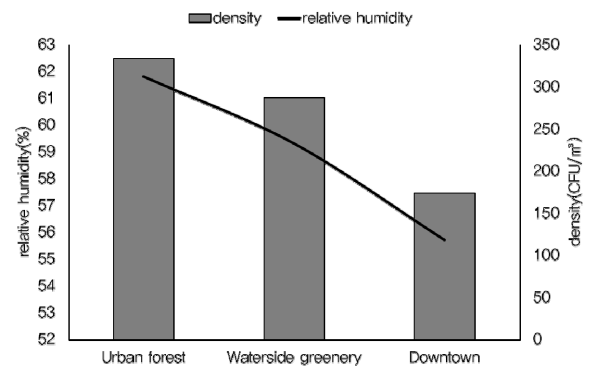


Figure 7. Relative humidity and density results.

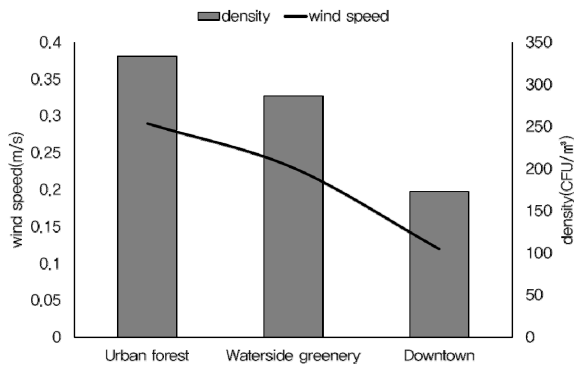


Figure 8. Wind speed and density results.

미비한 실정으로 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료되었다.

2) 측정지점별 세균 동정 및 계통분석

(1) 세균 동정

토지이용 유형별 측정 대상지에서 3일간 포집한 바이오에어로졸 중 배양성 세균은 총 119개 세균 집락의 순수배양을 얻었으며, 이중 PCR증폭 후 결과가 좋은 99종을 동정하였다. Table 2과 같이 토지피복유형별 바이오에어로졸 중 배양성 세균을 동정한 결과 *Micrococcus*, *Sphingomonas*,

*Amnibacterium*속 등 43개의 속이 동정되었다. 배양된 세균의 종 다양성 측면에서는 수변녹지 22속, 도시 숲 21속, 도심지 17속으로 조사되었으며, 종수의 경우 수변녹지 37종, 도심지 31종, 도시 숲 31종으로 나타났다. 3가지 유형의 도시 숲, 수변 녹지, 도심지에 모두 분포하는 세균은 *Bacillus toyonensis*, *Pseudarthrobacter oxydans*으로 조사되었으며, 도시 숲과 수변녹지와 같은 녹지지역에서 존재하는 *Herbiconiux flava*종을 확인하였다. 동정된 세균 중 개체수가 가장 많은 속은 *Bacillus*속 총 11종으로 전체 비율의 11%를 차지하였으며, *Microbacterium*속 10종 10%의 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

(2) 계통분석

분리된 미생물의 계통분석을 위해 관련 염기서열들은 BLAST(Basic Local Alignment Search Tool)로 미국 국립미생물정보센터(National Center for Biotechnology Information; NCBI)의 GenBank에 등록된 rRNA/ITS databases 중 16S ribosomal RNA sequences (Bacteria and Archaea) 서열과 비교하였으며, BioEdit (version 7.0.5.3)을 사용하여 ClustalW Multiple Alignment 하였다. 또한, FigTree (version 1.4.4)를 이용하여 측정지점별 계통수를 Figure 9, Figure 10, Figure

Table 2. Cultivated germ sympathy results

Number	Genus	Species	Isolated spot			Number	Genus	Species	Isolated spot		
			Urban forest	Waterside greenery	Downtown				Urban forest	Waterside greenery	Downtown
1	<i>Achromobacter</i>	<i>pulmonis</i>		O		33	<i>Pseudarthrobacter</i>	<i>oxydans</i>	O	O	O
2	<i>Aeromicrobium</i>	<i>choanae</i>			O			<i>helvolus</i>		O	
3	<i>Agrobacterium</i>	<i>larrymoorei</i>	O			34	<i>Pseudomonas</i>	<i>donghuensis</i>		O	
4	<i>Amnibacterium</i>	<i>kyonggiense</i>	O					<i>coleopterorum</i>	O		
5	<i>Aquicola</i>	<i>tertiaricarbonis</i>		O		35	<i>Psychrobacillus</i>	<i>lasicapitis</i>			O
6	<i>Arsenicococcus</i>	<i>bolidensis</i>		O		36	<i>Rathayibacter</i>	<i>tritici</i>	O		O
7	<i>Arthrobacter</i>	<i>agilis</i>	O			37	<i>Rhizobium</i>	<i>soil</i>			O
		<i>oryzae</i>	O					<i>pecuniae</i>			O
8	<i>Aureimonas</i>	<i>phyllosphaerae</i>	O			38	<i>Roseomonas</i>	<i>vinacea</i>		O	
		<i>asahii</i>			O			<i>mucosissima</i>	O		
		<i>cucymis</i>		O		39	<i>Sphingomonas</i>	<i>panacis</i>	O		
		<i>mobilis</i>			O			<i>panni</i>		O	
		<i>toyonensis</i>	O	O	O			<i>polyaromaticivorans</i>	O		
10	<i>Brevibacillus</i>	<i>agri</i>			O	40	<i>Staphylococcus</i>	<i>equorum</i>		O	
		<i>fluminis</i>			O			<i>albogriseolus</i>	O		
11	<i>Brevundimonas</i>	<i>vesicularis</i>		O				<i>aurantiogriseus</i>	O		
12	<i>Caballeronia</i>	<i>humi</i>	O			41	<i>Streptomyces</i>	<i>fulvissimus</i>	O		
		<i>jiangsuensis</i>	O					<i>siamensis</i>		O	
13	<i>Cellulomonas</i>	<i>iranensis</i>	O								
14	<i>Curtobacterium</i>	<i>citreum</i>		O							
		<i>pusillum</i>		O							
15	<i>Dermacoccus</i>	<i>nishinomiyaensis</i>			O						
16	<i>Frigoribacterium</i>	<i>faeni</i>		O							
17	<i>Herbiconiux</i>	<i>flava</i>	O	O							
18	<i>Hymenobacter</i>	<i>tibetensis</i>			O						
19	<i>Janibacter</i>	<i>hoylei</i>	O								
		<i>melonis</i>			O						
20	<i>Kocuria</i>	<i>oecani</i>		O							
21	<i>Massilia</i>	<i>agri</i>			O						
		<i>suwonensis</i>	O								
		<i>aquaticum</i>		O	O						
22	<i>Methylobacterium</i>	<i>komagatae</i>		O							
		<i>pseudosasicola</i>		O							

Number	Genus	Species	Isolated spot			Number	Genus	Species	Isolated spot		
			Urban forest	Waterside greenery	Downtown				Urban forest	Waterside greenery	Downtown
23	<i>Micrococcus</i>	<i>aloeverae</i>	O								
		<i>hibisci</i>		O							
		<i>hydrothermale</i>		O	O						
24	<i>Microbacterium</i>	<i>invictum</i>			O						
		<i>maritypicum</i>		O							
		<i>neimengense</i>			O						
		<i>oleivorans</i>			O						
25	<i>Miniimonas</i>	<i>arenae</i>		O							
26	<i>Modestobacter</i>	<i>muralis</i>			O						
27	<i>Moraxella</i>	<i>osloensis</i>			O						
28	<i>Noviherbaspirillum</i>	<i>canariense</i>		O							
29	<i>Novosphingobium</i>	<i>panipatense</i>	O								
30	<i>Paenarthrobacter</i>	<i>nicotinovorans</i>		O							
		<i>cucumis</i> <i>Kampfer</i>		O							
31	<i>Paenibacillus</i>	<i>curdolanolyticus</i>		O							
		<i>dongdonensis</i>	O								
32	<i>Paraburkholderia</i>	<i>caledonica</i>	O								
42	<i>Variovorax</i>	<i>boronicumulans</i>	O								
43	<i>Williamsia</i>	<i>muralis</i>			O						

11과 같이 작성하였다.

(3) 측정지점별 세균 비교 분석

도시 숲에서 동정된 세균은 *Bacillus*, *Caballeria* 등을 포함한 총 20속으로 동정 되었으며, 이중 가장 많이 분포하는 세균은 Table 3과 같이 *Sphingomonas*, *Streptomyces*, *Cellulomonas*, *Bacillus*속으로 각각 3종씩 분포하여 도시 숲에서 가장 높은 10%의 비율을 차지하였다. *Bacillus toyonensis* 총 3종, *Sphingomonas mucosissima*, *Sphingomonas panacis*, *Sphingomonas polyaromaticivorans*, *Streptomyces albogriseolus*, *Streptomyces aurantiogriseus*, *Streptomyces fulvissimus* 각각 1종씩 분포하였으며, *Caballeria humi* 1종, *Caballeria jiangsuensis* 1종으로 총 2종, *Arthrobacter agilis* 1종, *Arthrobacter oryzae* 1종 총 2종으로 7%의 비율을 차지하였다. 도시 숲에서만 발견된 세균의 속의 경우 *Agrobacterium*을 포함한 11종으로

조사되었으며, *Agrobacterium*는 토양에서 분리된 세균으로 식물의 상처 또는 뿌리를 통하여 세포의 형질 변화를 일으키는 원인 중 하나이다. *Arthrobacter*는 *Agrobacterium*와 동일하게 토양에서 분리되어 농업으로 오염된 토양의 농약을 분해하는 긍정적인 효과를 가진 것으로 알려져 있으며, *Caballeria*는 생물학적 질소 고정을 수행하여 식물 성장을 촉진하는 것으로 보고되었다. 또한, *Caballeria*와 *Paraburkholderia* 유사한 형질을 갖지만 대부분 소나무와 같은 침엽수의 생물학적 질소 고정을 수행하며, 다른 질소 고정 생물과 달리 일반적으로 인체에 대한 피해는 밝혀진 바 없다. 마지막으로 *Cellulomonas*는 *cellulose*를 분해하는 특징을 가진 미생물로서 *endoglucanase*와 *exoglucanase*같은 효소를 이용하여 분해하는 특징을 가진 미생물로 알려져 있다.

9수변 녹지에서 동정된 세균은 22속으로 동정되었다. 이중 가장 많이 분포하는 세균은 *Microbacterium*속으로 4종이

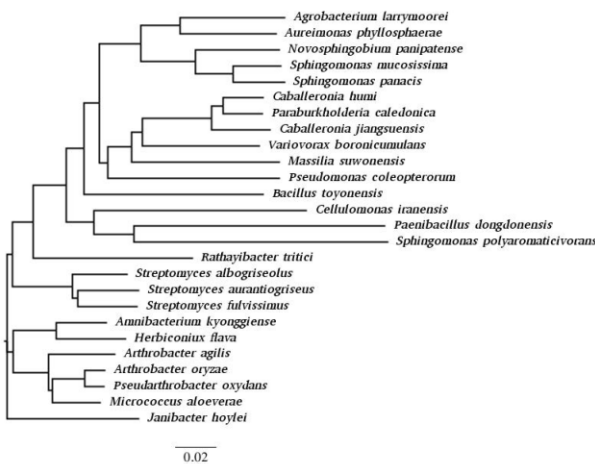


Figure 9. Urban forest Lineage.

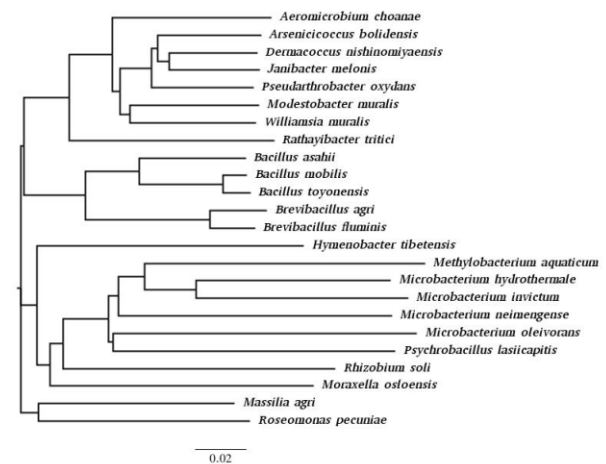


Figure 10. Waterside greenery Lineage.

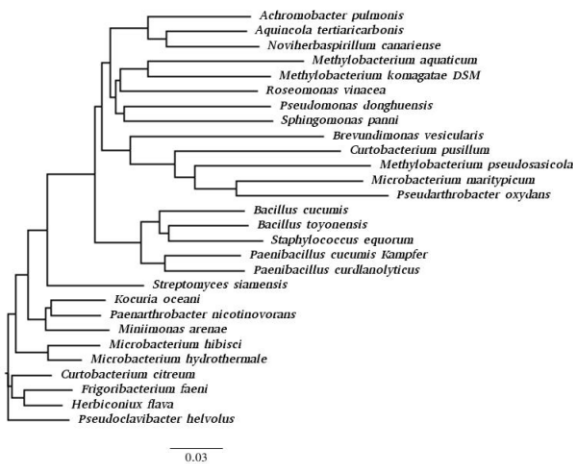


Figure 11. Downtown Lineage.

분포하여 수변 녹지지역에서 가장 높은 11%의 비율을 차지하였으며, *Microbacterium maritipicum* 2종, *Microbacterium hibisci*, *Microbacterium hydrothermale* 각각 1종씩 분포하는 것으로 분석되었다. 그 외 *Staphylococcus*, *Methylobacterium*, *Brevundimonas*, *Curtobacterium*속이 총 3종씩 분포하여 8%의 비율을 차지하였으며, *Pseudarthrobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Paenibacillus*속이 총 2종씩 5%의 비율을 차지하였다. 수변 녹지에서만 발견된 세균의 속의 경우 *Brevundimonas*을 포함한 10속으로 분석되었으며, 대기미생물의 경우 유전학적 연구가 다수 진행되어 인체에 대한 연구는 전무한 실정이었다. 그러나 발견된 종중 *Staphylococcus*는 포도상 구균으로 많은 종은 질병을 유발할 수 없으며, 인간과 다른 동물의 피부와 점막에서 발견된 것으로 보고되었다. 이는 공원의 특성으로 유동인구가 많은 특징의 결8과로 사료되었다.

도심지에서 동정된 세균은 17속이 동정되었다. 이중 가장 많이 분포하는 세균의 경우 *Bacillus*, *Microbacterium*속으로 *Bacillus asahii* 1종, *Bacillus mobilis* 1종, *Bacillus toyonensis* 4종, *Microbacterium hydrothermale* 2종, *Microbacterium invictum* 2종, *Microbacterium neimengense* 1종, *Microbacterium oleivorans* 1종으로 총 6종씩 분포하였으며, 가장 높은 19%의 비율을 차지하였다. 또한, *Brevibacillus*, *Janibacter*, *Moraxella*, *Rathayibacter*속은 각 2종씩 분포하여 6%의 비율을 차지하였다. 이밖에 모든 세균들은 1종씩 분포하였으며, 3%의 비율을 차지하였다. 도심지에만 발견된 세균은 *Aeromicrobium*을 포함한 7속으로 측정지점별 가장 낮은 것으로 조사되었다. *Brevibacillus*속은 인체에는 병원성은 아니지만, 특정 곤충에 대해서만 병원성을 보이는 특징을 가진 것으로 분석되었으며, 발견된 *Moraxella*는 일반적으로 호흡기 질환을 유발한다. 만성 흉부 질환 및 면역력이 저하된 환자의 경우 호흡기 내부로 접근하여 기관지염, 폐렴 등을 유발할 가능성이 높으며,

면역력이 다소 약한 노인과 어린이 및 환자에게 호흡기 감염의 대부분 발생빈도가 높다.

발견된 세균의 동정결과 도시 숲에서 발견된 *Caballeronia humi*종은 식물의 뿌리와 줄기, 토양에서 분리되었으며, 호기성으로 운동성이 없는 박테리아로 보고되었다. 모든 측정지점에서 발견된 *Bacillus toyonensis*로 분리된 물질이 페니실린에 대하여 높은 내성을 보이며, 성장을 억제하여 새로운 항균 화합물 공급원으로 제공할 가능성이 높다는 연구가 보고되었다. 또한, 동정된 세균 중 *Sphingomonas*속의 경우 검출된 항생제의 절반 이상이 *Sphingomonas*속으로부터 파생되었으며, 마지막으로 *Streptomyces*는 항생제, 항진균제 등 광범위하게 이용하고 수많은 항균 약제의 공급원 중 하나로 보고되었다.

위의 세균의 속에 대한 설명은 세균의 포괄적인 특징을 설명하였으며, 인체에 미치는 영향에 대한 세부적인 연구는 세균들의 정보가 현재까지 부족한 실정이다. 세균에 대한 병원성 및 인체의 유익·유해한 정도를 명확하게 확인할 수 없었으며, 본 연구에서 발견된 세균이 인체의 유익·유해성에 대한 정보로 확정하는 것은 무리가 있을 것으로 사료되었다. 또한, 측정시기인 겨울이라는 특정 계절에 대한 연구를 진행하였기 때문에 대기 중에 부유하는 세균에 대한 장기적 연구를 통하여 명확한 분석과 연구가 필요할 것으로 사료되었다.

본 연구는 겨울철 토지피복유형별 바이오에어로졸의 특성을 분석하는 연구로서 진행되었으나 제한된 계절의 특성으로 모든 계절별 변화 추이와 특성을 대표하기에는 부족하였다. 또한, 점심시간 12~13시까지의 시간에서 연구를 진행하여 특정 시간 중 바이오에어로졸을 조사·분석하였기에 미기상변화에 따른 세부적인 변화정도는 발견하지 못하였다. 따라서 추후 연구에서는 사계절 장기모니터링으로 바이오에어로졸 중 배양성 세균에 미치는 복합적인 연구와 인체에 대한 연구가 필요할 것으로 사료되었다.

REFERENCES

- Coleman, K., T. Nguyen, S. Yadana, C. Estruch, W. Lindsley and G. Gray(2018) Bioaerosol Sampling for Respiratory Viruses in Singapore’s Mass Rapid Transit Network. *Science Reports* 2018(8): 1-7.
- Douwes, J., P. Thorne, N. Pearce and D. Heederik(2003) Bioaerosol Health Effects and Exposure Assessment: Progress and Prospects. *British Occupational Hygiene Society Published* 47(3): 187-200.
- Fung, F. and W.G. Hughson(2003) Health effects of indoor fungal

- bioaerosol exposure. *Appl Occup Environ*. 18: 535-544.
- Go, J.Y., C.G. Jung, M.J. Cha, G.N. Park, M.G. Kim and J.S. Kim(2012) Distribution and Characteristics of Microorganisms Associated with Settled Particles During Asian Dust Events. *Korean Journal of Microbiology* 48(2): 134-140.
- Griffin, D.W.(2007) Atmospheric Movement of Microorganisms in Clouds of Desert Dust and Implications for Human Health. *Clinical Microbiology Reviews* 20(3): 459-477.
- Ha, K.C. and N.W. Back(1991) Assessment of Indoor and Outdoor Air Quality through Determination of Microorganism. *Journal of Korean Industrial Hygiene* 1(1): 73-81.
- Ichinose, T., S. Yoshida, K. Hiyoshi, K. Sadakane, H. Takano, M. Nishikawa, I. Mori, R. Yanagisawa, H. Kawazato, A. Yasuda and T. Shibamoto(2008) The Effects of Microbial Materials Adhered to Asian Sand Dust on Allergic Lung Inflammation. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 55: 348-357.
- Karottki, D., S. Michal, F. Marie, A. Zorana Jovanovic, M. AnneMette, K. Matthias, M. Andreas, G. Lars, M. Peter and L. Steffen(2015) Indoor and Outdoor Exposure to Ultrafine, Fine and Microbiologically Derived Particulate Matter Related to Cardiovascular and Respiratory Effects in a Panel of Elderly Urban Citizens. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12: 1667-1686.
- Lee, C.M., Y.S. Kim, T.H. Lee, W.S. Park and S.C. Hong(2004) Characterization of Airborne Bioaerosol Concentration in Public Facilities. *J. of the Environmental Sciences* 13(3): 215-222.
- Lee, S.Y., H.M. Jung, S.J. Park, B. Choi, J.H. Kim, B.L. Lee, Y.L. Yoo, O.S. Kwon and W.H. Jung(2015) Identification and phylogenetic analysis of cultures in bio-aerosols according to environmental types. *Microbiol. Biotechnol. Lett.* 43(2): 142-149.
- Park, C.W., Y.H. Young and J.H. Hwang(2010) A study on the situation and development for the antimicrobial technologies of bioaerosol. *Particle and Aerosol Research* 6(2): 69-80.
- Park, J.Y. and S.U. Kim(2009) Investigation of Concentration of Bio-aerosol according the Change of Indoor Temperature and Humidity. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning&Design* 25(11): 349-356.
- Song, B.G. and K.H. Park(2013) Air Ventilation Evaluation at Nighttime for the Construction of Wind Corridor in Urban Area. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 16(2): 16-29.
- Song, I.S., Y.S. Hae, Y.K. Lee, Y.G. Min, B.H. Jung and S.W. Lee(2015) Distribution Characteristics of Bio-Aerosol and Carbon Dioxide in Forest Atmosphere. *J. of Korean Society of Environmental Technology* 16(1): 53-63.
- Yoo, H.J., K.J. Yoo and J.H. Park(2015) Screening of possible bacterial pathogens in sludge and bioaerosol from WWTP. *Korean Society of Civil Engineers Conference* 2015(10): 189-190.
- Yoon, Y.H. and T.G. Song(2002) Change in Relative Humidity According to Green Belt Conditions. *Nature Science Research Journal* 13(2): 45-51.
- Yun, H.C. and J.S. Lee(2014) Correlation Analysis between Urban Heat Island map and Evaluation Map of Wind Corridor Formation. *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science* 5: 99-100.