

실내공기 중 부유세균의 실시간 예측시스템 연구

박자영 · 김영란 · 최수원 · 이수미 · 이용직 · 오재호^{a)} · 최지수^{a)} · 황정호^{a)} · 변정훈^{b)}

환경유해검사과

Study on the real-time prediction system of bioaerosols in indoor air

J. Y. Park, Y. R. Kim, S. W. Choi, S. M. Lee, Y. J. Lee, J. H. Oh^{a)}, J. S. Choi^{a)},
J. H. Hwang^{a)} and J. H. Byeon^{b)}

Environmental Hazard Inspection Division

Abstract

Bioluminescence is the phenomenon that light produced through adenosine triphosphate (ATP) reaction with enzyme luciferase. This method (ATP method) is one of the fastest way to evaluate the bioaerosol concentration in the air. In this study, a linear relationship was obtained between the results of the ATP method (RLU/m³) and conventional culture-based method (CFU/m³) with R² value and corresponding equation both in the general and vulnerable facilities. The R² values fit well (≥ 0.85) except for the sampling points in a turbulent state (0.46) and in operation of the air conditioning system (0.13), where the obtained results were close to the limit of detection (LOD). In addition, identification of sampled colonies in the vulnerable facilities represented Staphylococcus and Micrococcus, which are usually observed on the skin and mucosa of humans and animals.

Key Words : Bioaerosol, Adenosine triphosphate, Bioluminescence, Indoor air quality

^{a)} School of Mechanical Engineering, Yonsei University

^{b)} School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

1. 서 론

현대인은 주로 집이나 직장에서 약 90 %의 시간을 실내에서 보내기 때문에¹⁾ 실내 환경은 인간의 삶에 크게 영향을 끼친다. 실내 공기질을 평가하는 요소 중 바이오에어로졸(Bioaerosol)은 바이러스, 박테리아, 곰팡이와 같은 대기 중 부유하고 있는 생물학적 특성을 가지고 있는 입자상 물질이며, 인간의 건강과 환경에 중요한 영향을 미친다. 인간이 흡입한 바이오에어로졸은 호흡기에 침착되어 자극, 알레르기, 전염병, 급성 독성 효과, 암을 유발할 수 있으며, 농도가 높을 경우 사망에 이를 수도 있다.^{2~4)}

특히, 최근 코로나바이러스 감염증(COVID-19)의 세계적 규모 확산과 관련하여 바이오에어로졸에 대한 관심이 크게 증가하였고, 인간과 환경을 생물학적 위협으로부터 보호하기 위하여 공기 중 부유한 바이오에어로졸의 신속한 모니터링에 대한 필요성이 대두되고 있다. 각 국가에서는 실내 공기질 관리를 위하여 공기 중 부유균에 대한 기준을 세우고 있는데, 홍콩에서는 실내 공기질을 평가하기 위해 실내공기질을 최우수, 우수로 분류하고 있다. 실내 공기질을 나타내는 여러 항목 중 총 부유세균에 대해서는 500 CFU/m³이 최우수, 1000 CFU/m³이 우수 등급으로 분류되어 관리 되고 있다.⁵⁾ 일본에서는 부유세균에 대한 관리기준이 별도로 없지만, 일본건축학회에서 일반사무실의 환경에서 500 CFU/m³ 이하로 유지할 것을 권장하고 있다.⁶⁾

권고 기준에 쓰이는 단위는 배양 기반에 생성된 군집(CFU, colony forming unit)을 계수함

으로써 얻어 질 수 있는데, 바이오에어로졸의 농도를 추정하는 데 가장 널리 사용되는 방법이다.⁷⁾ 그러나 이 방법으로 부유균 농도를 산출해 내기 위해서는 샘플링 후 배양을 해야 하기 때문에 현장에서 즉시 농도 결과를 알 수 없다.

현장에서 바이오에어로졸의 농도를 신속하게 산출하는 가능적 대안으로는, Adenosine triphosphate(ATP)와 효소인 Luciferase의 반응을 통해 생성된 빛을 측정하는 것이다. ATP는 모든 생명체의 세포에 존재하며 에너지를 공급하는 유기화합물이다. ATP가 효소인 Luciferase를 만나면 빛을 만드는데 이 현상을 ATP 생물발광이라고 한다. 박테리아는 단세포이기 때문에 빛의 세기를 알면 박테리아의 농도를 역으로 추산이 가능하다.⁸⁾ ATP 생물발광 분석의 효율성은 많은 연구에서 평가되었으며 이러한 연구 중 일부는 군집계수법과의 정합도를 비교함으로써 수행되었다.^{9~12)}

본 연구에서는 실내 현장을 대상으로 ATP 생물발광법을 이용한 면봉기반 샘플러를 통한 빛의 세기 RLU(relative light unit) 값과 Andersen six-stage impactor를 이용하여 배양법에 기반한 바이오에어로졸의 농도 측정을 수행하였고 이의 정합도를 도출하였다.

또한 현장에서 샘플링 된 미생물을 배양 후 질량 분석법을 통하여 동정분석을 진행하였다. MALDI-TOF 질량분석은 매트릭스물질과 시료를 결합한 고체상태의 결정에 레이저 펄스를 조사하여 분석물질을 이온화시키고, 이온화된 물질의 비행시간을 측정하여 분석물질의 질량을 검출한다.¹³⁾ 세균 세포의 단백질을 직접 분석하여 미생물을 구별하는 MALDI-TOF MS 질량분석법은

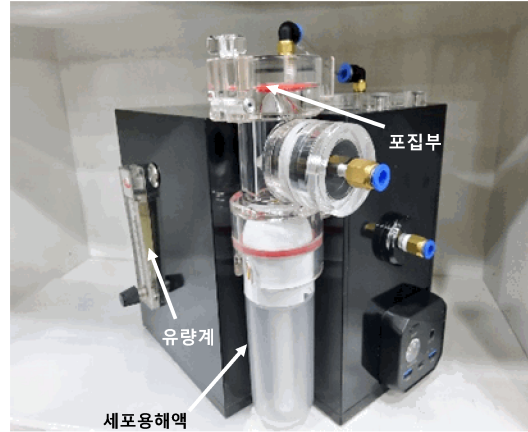


Fig. 1. The developed swab-type air sampler.

다양한 연구에 의해 구축되었다.^{14~16)}

본 연구에서는 생체분자의 분석을 위해 현재 까지 널리 쓰이고 있는 MALDI-TOF MS (matrix-assisted laser desorption/ionization-time-of-flight) 시스템을 이용하여 샘플링 대상 장소의 균 중 분석 또한 진행하였다.^{17~20)}

2. 재료 및 방법

2.1. 샘플러

본 연구에서 사용된 면봉기반 샘플러는 휴대가 용이하도록 길이, 너비, 높이가 각각 280 X 260 X 195 (mm)의 크기로 제작되었다.(Fig. 1)

샘플 공기는 샘플러 입구에서 유입되며 입자상 물질과 들어오는 바이오에어로졸의 신호 민감도를 높이기 위하여 세포용해액이 초음파가습 형태로 분사가 된다. 세포용해액 액적과 유입된 입자상 물질은 포집부에 놓이는 면봉 표면에 포집

이 된다.

샘플러는 상용 생물발광기반 ATP 표면 면봉 키트(UXL100, 3M, USA)와 발광면역분석기(luminometer, 3M, USA)를 조합하여 상대적인 빛의 세기로 바이오에어로졸 농도를 산출할 수 있다.

2.2. RLU 농도 산출 과정

샘플러와 상용 면봉키트 및 발광면역분석기를 통한 공기 중 부유균 산출은 5분동안 이루어진다.(Fig. 2) 5분간 5 LPM의 유량으로 공기가 샘플링되며, 5분간 샘플링의 후반 30초는 초음파가습기를 통한 세포용해액 분사가 동시에 이루어진다. 샘플링 후, 면봉은 루시페라제 효소의 용액이 담긴 용기와 결합하여(UXL100) 10초간 와류믹서를 거친 후 발광면역분석기를 통해 RLU 값이 산출된다.

산출된 RLU값은 포집공기 25 L기준이므로 기준부피 1000 L(1 m³)에 대한 값을 구하기 위하여 보정상수를 곱하여 RLU/m³ 단위의 농도를 산출한다.

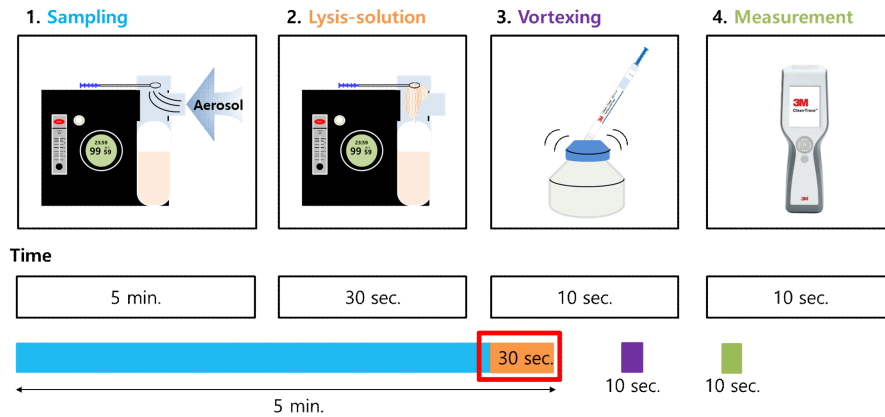


Fig. 2. Standardized process of sampling for RLU measurement.

2.3. CFU 농도 산출 과정

배양 기반 균집계수법을 통한 CFU농도 산출은 실내공기질 공정시험 기준의 “실내공기중 총부유세균 측정방법-충돌법”을 준수하여 진행하였다.²¹⁾ 장소마다 동시에 2대의 시료 채취기인 Andersen six-stage impactor(TE-10-830, Tisch Environmental Inc, USA)를 가동하여 2~3회 반복 샘플링하였다. 공기의 흡입을 위한 펌프는 28.3 LPM의 일정한 유량으로 가동이 되었고, 샘플링 전에 각 펌프에 대한 보정을 통해 유입유량을 일정하게 맞추어 유입유량의 차이로 인한 오차를 방지하였다.

사용한 배지는 TSA(Tryptone Soya Agar, Komed사)로 공기 중 부유세균이 수집된 미생물 배지는 즉시 각 실험실로 운반하여 35℃ ± 1 로 온도가 유지된 배양기(VS-1203P1-150, visionbionex, Korea)와 같은 온도 조건을 가진 배양기(JP/MIR 553, Sanyo)에 배양하였다. 배양 후, 48 시간 후에 형성된 콜로니의 수를 계수하여 CFU를 산출

하는데, 이 때 산출된 CFU 값은 샘플링 공기부피인 141.5 L에 대한 값이므로 RLU와 마찬가지로 기준부피 1000 L(1 m³)를 맞추기 위하여 보정 상수를 곱해 CFU/m³의 단위로 산출하였다.

2.4. 측정 대상

본 연구의 대상시설은 다중이용시설 중 취약계층 이용시설인 의료시설, 노인요양시설, 어린이집 그리고 일반시설로써 대학 건물 로비, 학생 식당에서 측정하였다.

2.5. 동정 분석

샘플링 된 미생물 콜로니는 MALDI 시료 플레이트에 도말하여 실온 건조한 후 70% formic acid 2 μL를 시료에 첨가한 후 건조한다. 건조 후에 α-cyano-4-hydroxycinnamic acid 용액 1 μL를 도포하여 실온 건조시킨다. 시료와 매트릭스의 균일한 크리스탈이 형성되면 MALDI-TOF 질량분석기에 삽입하여 분석한다. MALDI

-TOF 질량분석기는 Autoflex Max (Bruker)를 사용하였다. 미생물 동정 결과는 Biotyper 3.0 (Bruker)에 수록된 표준 질량스펙트럼과 시료의 질량스펙트럼을 비교하여 매칭 스코어로서 표현되는데 Biotyper 3.0은 0에서 3 사이의 점수 값(score values, SV)을 표현한다. 일반적으로 (i) $SV \geq 2.3$ 에서 가능한 종 식별, (ii) $SV \geq 2.0$ 에서 안전한 속 식별 및 가능한 종 식별, (iii) $SV \geq 1.7$ 에서 가능한 속 식별, (iv) $SV < 1.7$ 에서 신뢰할 수 있는 식별 없음으로 SV의 점수값에 따른 동정분석 신뢰도를 나타낸다.^{22, 23)}

3. 결과 및 고찰

3.1. 측정장소에 따른 RLU-CFU 정합도

민감시설군과 일반시설군 모든 측정지점에서 산출된 RLU값과 샘플링한 시료의 균집계수값인 CFU값과의 관계를 도시하였다. (Fig. 3) 정합도

의 척도로써 결정계수(R-squared value)를 통하여 도시하였고, 민감시설군에서 어린이집 (0.4594)과 의료기관인 대학병원(0.1319)을 제외하고 모두 0.85를 상회하는 높은 정합도를 보였다.

민감시설군인 어린이집에서 정합도가 낮게 나온 원인으로는 샘플링 시점에 측정지점 주변 재실자의 활발한 활동으로 인하여 안정적인 측정환경이 조성되지 못한 부분이 있을 수 있다. 본 연구는 공기 중 부유하고 있는 미생물을 샘플링하여 그 농도를 추정하는 연구로써 공기 중 미생물의 생물학적 특성 뿐만아니라 공기 중 부유하는 에어로졸로써의 물리적 거동특성 즉 입자크기, 브라운 운동, 중력침강, 전기적 특성, 확산 등의 영향도 고려해야 한다. 이러한 특성은 인체의 어느 특정 부위에 얼마만큼의 양과 형태에 따라 침착되고 있는지에 따라 영향이 달라진다.²⁴⁾ 동시에, 인간도 바이오에어로졸의 발생원이기 때문에, 어린이집의 측정환경과 같이 짧은 시간내의 급격

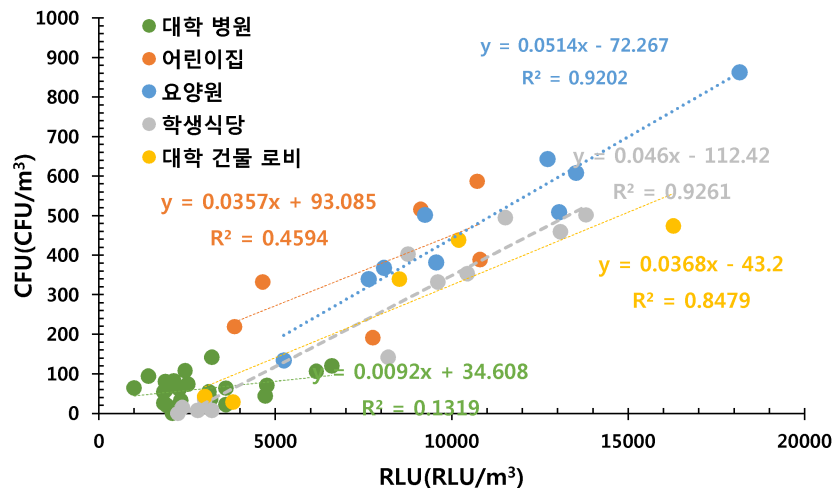


Fig. 3. The results of the field test; correlation of RLU-CFU.

I . 연구사업

한 발생원의 움직임은 본 연구에서 사용되는 ATP 샘플러 및 Andersen six-stage viable impactor에 교란을 일으킬 수 있다.

민감시설군 중 의료기관인 대학병원에서는 제일 낮은 결정계수가 도출되었는데, 샘플링 당시 병원에서는 공조시스템을 가동하여 공기질 관리를 하고 있었고 특히 샘플링 장소는 건물 입구와 멀지 않았기 때문에 환기가 잘 되는 환경이었다. 이러한 요인들로 인하여 대체적으로 RLU와 CFU 모두 낮은 값이 산출 되었으며 대부분의 수치가 낮게 나와 RLU 산출 장비인 발광면역분석기의 LOD (limit of detection) 하한 값에 가깝게 나왔기 때문에 낮은 정합도를 보인 것으로 추측된다.

3.2. 배양기에 따른 RLU-CFU 정합도

이번 연구에서, CFU 산출을 위한 두 개의 시료 채취기에서 샘플링 된 배지는 각각 영남대학교와 경북보건환경연구원에서 보유하고 있는 배양기

에서 $35^{\circ}\text{C} \pm 1$ 로 유지된 온도조건에서 배양되었다. 각 기관에서 보유하고 있는 동일온도 조건의 배양기에서 산출된 CFU값에 따라 RLU-CFU 정합도를 산출하여 도시하였다.(Fig. 4)

결정계수는 영남대학교에서 0.85, 경북보건환경연구원에서 0.72로 모두 통계적으로 유의하며 좋은 정합도를 나타내었지만, 같은 RLU 값 및 같은 온도조건에서 배양된 미생물 배지에서 계수된 CFU 값이 다르다는 것은 측정장소에서 채집된 공기가 동일한 것이 아니기 때문에 이러한 결과를 나타낼 수 있으며, 마찬가지로 이는 RLU 산출을 위한 샘플러의 샘플링에서도 같은 편차를 나타낼 수 있음을 의미한다.

그림에서 정합도의 결정계수를 좌우하는 것은 이례적으로 큰 오차를 발생시키는 데이터에 기인한 것을 알 수 있으며, 정합도를 높이기 위해서는 현장에서 샘플링 횟수를 늘려 그 현장의 대표성을 갖는 값을 확보해야 함을 의미한다.

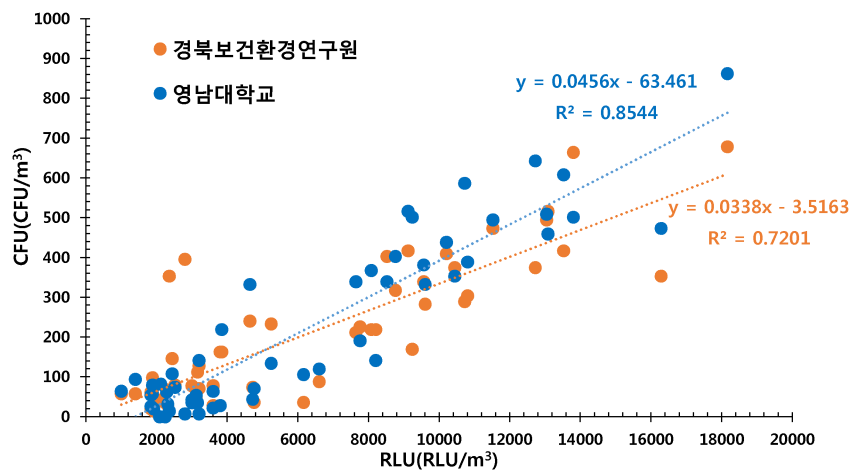


Fig. 4. The results of the field test; correlation of RLU-CFU with different CFU values from 1)GBHE 2)Yeungnam university.

3.3. 민감시설군 동정분석

본 연구에서 대상시설 중 민감시설군에 대한

동정분석을 진행 하였다. 민감시설군 중 의료기관인 대학병원에서 동정분석 결과는 다음과 같다. (Fig. 5)

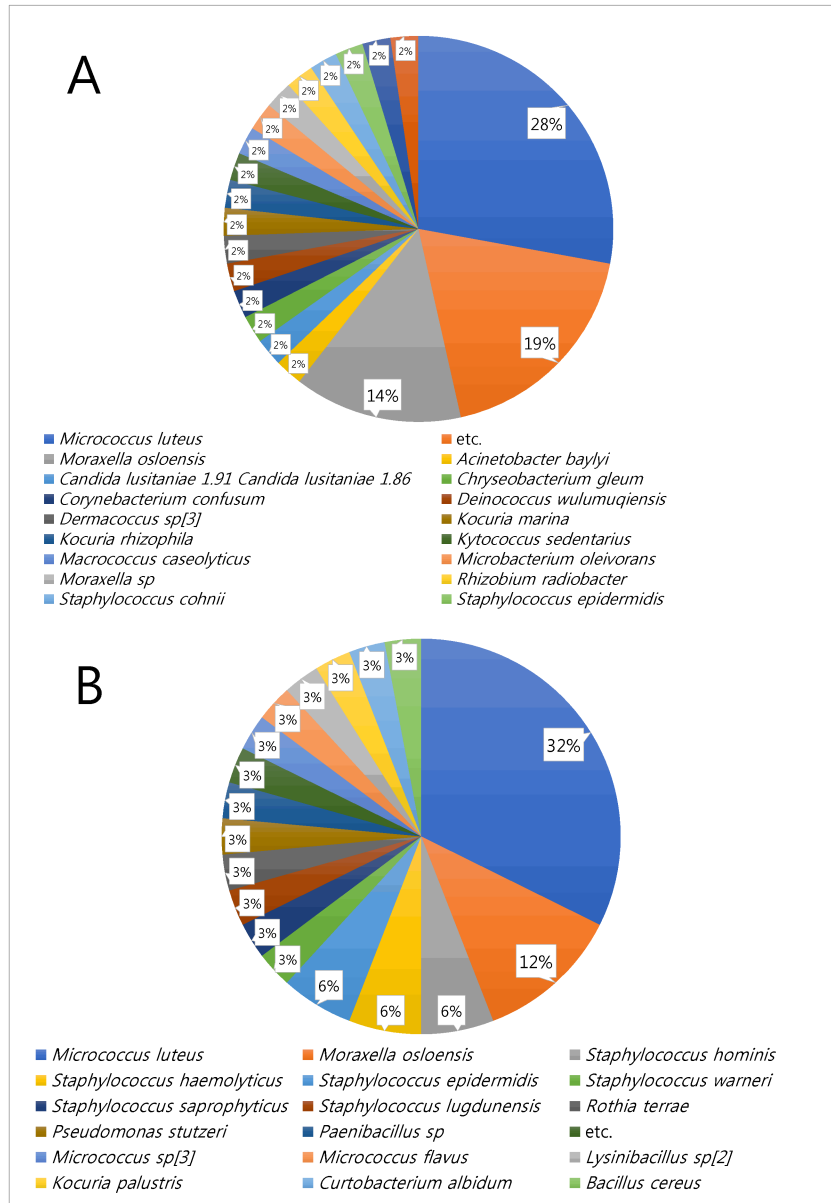


Fig. 5. Identification of sampled microorganism in the university hospital (A)main building lobby and (B)respiratory center lobby.

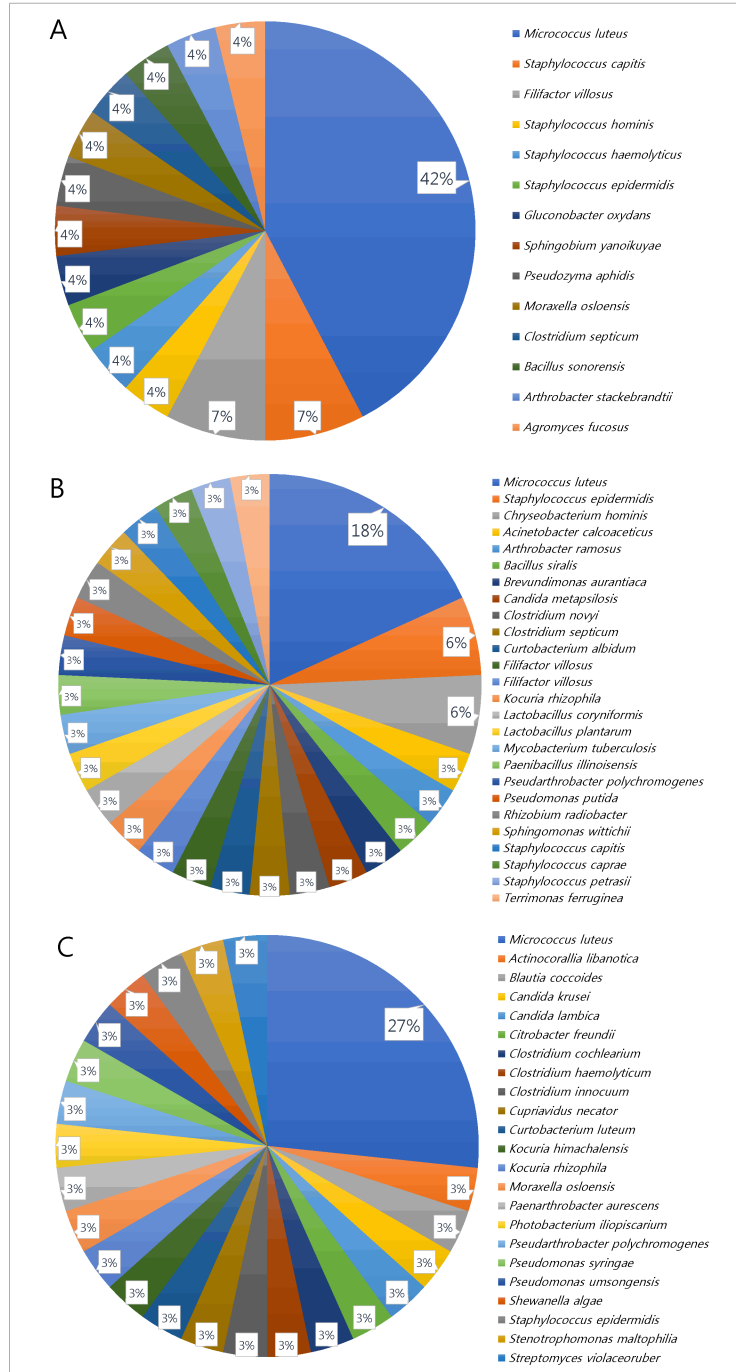


Fig. 6. Identification of sampled microorganism in the sanatorium (A) bedroom (B) dining room and (C) living room.

현장측정은 본 건물 로비와 호흡기 센터의 로비로 나누어 진행이 되었다. 동정분석 장비 점수 값에 따라 1.7 미만의 신뢰할 수 있는 식별 없음에 대한 데이터는 etc.로 나타내었다. 대학병원 본 건물과 호흡기센터 로비에서 샘플링 된 미생물의 종류는 인간 피부에서 많이 나오는, 사람이 많은 환경에서 주로 관측되는 *Micrococcus luteus* 종이나 *Moraxella osloensis*종 및 *Staphylococcus* 속이 많은 비율로 동정분석 되었다.

민감시설군 중 노인요양시설인 요양원에서의 동정분석 결과는 다음과 같이 나타났다.(Fig.6)

이 중 재실자의 수도 낮고 활동도 낮은 침실(Fig.6A)에 대비하여 재실자의 수도 많고 샘플링을 진행하는 동안 프로그램을 진행하였던 공동거실(Fig.6C)에서는 다양한 종의 미생물이 동정분석 되었다. 이는 인간의 활동에 따라 다양한 미생물이 공기 중에 부유할 수 있음을 나타낸다. 반면, 재실자가 조리원 1명이었던 식당(Fig.6B)에서는 제일 많은 종류의 미생물이 동정분석 되었다. 이는, 공기 중 부유한 미생물의 다양성이 재실자의 수 및 활동에 따라 변화하기도 하지만, 공간적인 특성에 따라 결정 될 수 있음을 의미한다. 또한, 대학병원에서의 결과와 마찬가지로 요양원 동정분석 결과도 사람이 많은 환경에서 자주 나타나는 *Micrococcus luteus* 종이나 *Staphylococcus* 속이 많은 비율로 동정분석 되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 실내공기중 바이오에어로졸의 농도를 신속하게 측정하는 ATP 생물발광법을 이용한 RLU값과 기존 균집계수법 CFU값의 정

량적 비교를 통해 높은 정합도를 도출하여 신속한 공중부유균 예측이 가능함을 확인하였다. 또한 RLU와 CFU의 정합도를 도출하는 동시에 현장에서 샘플링 된 미생물들의 동정분석을 통하여 공중 부유한 미생물 종의 다양성 측면에서의 분석도 시도해 보았는데, 본 연구에서의 결과를 종합하면 다음 3가지의 정보를 도출할 수 있다.

① RLU와 CFU의 정합도를 결정짓는 결정계수 및 식을 통하여 신속하게 측정할 수 있는 RLU값을 CFU값으로 산출이 가능하다. 또한 정합도를 높이기 위해서는 많은 횟수의 측정을 통해 측정장소에서 교란값을 제거하고, 큰 표준편차를 나타내지 않는 대표값을 선정하는 것이 중요하다.

② 다양한 장소에서 도출한 RLU 및 CFU값(공중 부유균의 농도)과 동정분석을 통한 결과(공중 부유균의 종 다양성)를 고려했을 때, 두 지표간의 상관관계는 보이지 않지만, 한정된 공간에서 공간 안에 있는 재실자와 활동을 고려하면 재실자의 활동량 증가가 공중 부유균의 농도와 종 다양성을 증가시킬 수 있다는 제한적인 결론이 도출 가능하다.

③ 본 연구에서 제안하는 공중 부유균 농도 신속 감지 방법을 이용하여 현장에서의 공중 부유균 농도를 알면 공조 시스템 가동 및 환기 등의 물리적 대응을 빨리 할 수 있기 때문에 농도 제어에 빠른 대응이 가능하다.

이번 연구를 통해 ATP기반 면봉삽입형 공기 샘플러를 이용하여 현장에서의 공중부유균 농도 진단이 신속하게 이루어져 공조 시스템 가동 및 환기 등의 후속 조치를 통하여 바이오에어로졸이

야기하는 감염병 발생의 예방 및 관리에 활용할 수 있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. Leech, Judith A., William C. Nelson, Richard T. Burnett, Shawn Aaron, and Mark E. Raizenne. "It's about time: a comparison of Canadian and American time-activity patterns." *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 12, no. 6 (2002): 427-432.
2. Douglas, Philippa, Sarah Robertson, Rebecca Gay, Anna L. Hansell, and Timothy W. Gant. "A systematic review of the public health risks of bioaerosols from intensive farming." *International journal of hygiene and environmental health* 221, 134~173(2018).
3. Kim, Ki-Hyun, Ehsanul Kabir, and Shamin Ara Jahan. "Airborne bioaerosols and their impact on human health." *Journal of Environmental sciences* 67 (2018): 23-35.
4. Xu, Zhenqiang, Yan Wu, Fangxia Shen, Qi Chen, Miaomiao Tan, and Maosheng Yao. "Bioaerosol science, technology, and engineering: past, present, and future." *Aerosol Science and Technology* 45, no. 11 (2011): 1337-1349.
5. HKEPD (The Hong Kong Environmental Protection Department), 2019. Guideline notes for the management of indoor air quality in offices and public places. Indoor Air Quality Management Group, HKEPD.
6. Ilkeda K. (2008) Difference of indoor airborne particular and biological contamination with various scales of buildings. In proceedings of the annual meeting on the society of indoor environment 2008. pp. 201-11.
7. Huang, H. L., Lee, M. K., & Shih, H. W. (2017). Assessment of indoor bioaerosols in public spaces by real-time measured airborne particles. *Aerosol Air Qual. Res.* 17, 2276-2288
8. Branchini, Bruce R., Tara L. Southworth, Danielle M. Fontaine, Dawn Kohrt, Munya Talukder, Elisa Michelini, Luca Cevenini, Aldo Roda, and Martha J. Grossel. "An enhanced chimeric firefly luciferase-inspired enzyme for ATP detection and bioluminescence reporter and imaging applications." *Analytical biochemistry* 484 (2015): 148-153.
9. Yoon, K. Y., Park, C. W., Byeon, J. H., & Hwang, J. (2010). Design and application of an inertial impactor in combination with an ATP bioluminescence detector for in situ rapid estimation of the efficacies of air controlling devices on removal of bioaerosols. *Environmental Science & Technology*, 44(5), 1742 -1746.
10. Park, C. W., Park, J. W., Lee, S. H., & Hwang, J. (2014). Real-time monitoring of bioaerosols via cell-lysis by air ion and ATP bioluminescence detection. *Biosensors and Bioelectronics*, 52, 379-383.
11. Park, J. W., Park, C. W., Lee, S. H., & Hwang, J. (2015). Fast monitoring of indoor bioaerosol concentrations with ATP bioluminescence assay using an electrostatic rod-type sampler. *PLoS One*, 10(5), e0125251.
12. Kim, H. R., An, S., Hwang, J., Park, J. H., & Byeon, J. H. (2019). In situ lysis droplet supply to efficiently extract ATP from dust particles for near-real-time bioaerosol monitoring. *Journal of*

- Hazardous Materials, 369, 684-690.
13. Ha, Miyoung, Eun Jung Son, and Eun Jeong Choi. "Application of MALDI-TOF Mass Spectrometry-Based Identification of Foodborne Pathogen Tests to the Korea Food Standard Codex." Korean Journal of Food Science and Technology. Korean Society of Food Science and Technology, October 31, 2016. doi:10.9721/kjfst.2016.48.5.437.
 14. Claydon, Martin A., Simon N. Davey, Valeria Edwards-Jones, and Derek B. Gordon. "The rapid identification of intact microorganisms using mass spectrometry." Nature biotechnology 14, no. 11 (1996): 1584-1586.
 15. Holland, R. D., J. G. Wilkes, F. Raffi, J. B. Sutherland, C. C. Persons, K. J. Voorhees, and J. O. Lay Jr. "Rapid identification of intact whole bacteria based on spectral patterns using matrix-assisted laser desorption/ionization with time-of-flight mass spectrometry." Rapid Communications in Mass Spectrometry 10, no. 10 (1996): 1227-1232.
 16. Murray, P. R. "Matrix-assisted laser desorption ionization time-of-flight mass spectrometry: usefulness for taxonomy and epidemiology." Clinical Microbiology and Infection 16, no. 11 (2010): 1626-1630.
 17. Dingle, Tanis C., and Susan M. Butler-Wu. "MALDI-TOF mass spectrometry for microorganism identification." Clinics in laboratory medicine 33, no. 3 (2013): 589-609.
 18. Bourassa L, Butler-Wu SM. MALDI-TOF Mass Spectrometry for Microorganism Identification. Vol. 42. pp. 37-85. In: Methods in Microbiology.
 - Norris JR, Ribbons DW (eds). Academic Press, Cambridge, MA, USA (2015)
 19. Murray, Patrick R. "What is new in clinical microbiology-microbial identification by MALDI-TOF mass spectrometry: a paper from the 2011 William Beaumont Hospital Symposium on molecular pathology." The journal of molecular diagnostics 14, no. 5 (2012): 419-423.
 20. Wieser, Andreas, Lukas Schneider, Jette Jung, and Sören Schubert. "MALDI-TOF MS in microbiological diagnostics-identification of microorganisms and beyond (mini review)." Applied microbiology and biotechnology 93, no. 3 (2012): 965-974.
 21. 국립환경과학원, "실내공기질공정시험기준(ES 02701.1d)", 국립환경과학원고시 제2021-94호(2021)
 22. Dybwad, Marius, Gunnar Skogan, and Janet Martha Blatny. "Temporal variability of the bioaerosol background at a subway station: concentration level, size distribution, and diversity of airborne bacteria." Applied and environmental microbiology 80, no. 1 (2014): 257-270.
 23. Choi, Ji-Weon, Hye-Eun Lee, Chang-Kug Kim, Won-Bae Kim, and Ji-Kang Kim. "Application of ATP Bioluminescence Assay for Measurement of Microbial Contamination in Fresh-Cut Produce Processing Lines." Korean Journal of Food Preservation. The Korean Society of Food Preservation, February 28, 2012. doi:10.11002/kjfp.2012.19.1.062.
 24. Kim, Yun-Sin, and Gi-Yeong Kim. "바이오에어로졸의 특성 및 측정방법." Air Cleaning Technology 20, no. 1 (2007): 1-39.

