

## The urgent need for microbiology literacy in society

Kenneth Timmis<sup>1</sup>, Ricardo Cavicchioli<sup>2</sup>, José Luis Garcia<sup>3</sup>, Balbina Nogales<sup>4</sup>, Max Chavarría<sup>5</sup>, Lisa Stein<sup>6</sup>, Terry J. McGenity<sup>7</sup>, Nicole Webster<sup>8</sup>, Brajesh K. Singh<sup>9</sup>, Jo Handelsman<sup>10</sup>, Victor de Lorenzo<sup>11</sup>, Carla Pruzzo<sup>12</sup>, James Timmis<sup>13</sup>, Juan Luis Ramos Martín<sup>14</sup>, Willy Verstraete<sup>15</sup>, Mike Jetten<sup>16</sup>, Antoine Danchin<sup>17</sup>, Wei Huang<sup>18</sup>, Jack Gilbert<sup>19</sup>, Rup Lal<sup>20</sup>, Helena Santos<sup>21</sup>, Sang Yup Lee<sup>22</sup>, Angela Sessitsch<sup>23</sup>, Paola Bonfante<sup>24</sup>, Lone Gram<sup>25</sup>, Raymond T. P. Lin<sup>26</sup>, Eliora Ron<sup>27</sup>, Z. Ceren Karahan<sup>28</sup>, Jan Roelof van der Meer<sup>29</sup>, Seza Artunkal<sup>30</sup>, Dieter Jahn<sup>1</sup>, Lucy Harper<sup>31</sup>

<sup>1</sup>*corresponding author*: Institute of Microbiology, Technical University Braunschweig, Germany, [kntimmis@gmail.com](mailto:kntimmis@gmail.com), <sup>2</sup>School of Biotechnology and Biomolecular Sciences, The University of New South Wales, Sydney, Australia, <sup>3</sup>Department of Environmental Biology, Centro de Investigaciones Biológicas (CIB) (CSIC), Madrid, Spain, <sup>4</sup>Grupo de Microbiología, Dept. Biología, Universitat de les Illes Balears, and Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados 8IMEDEA, UIB-CSIC), Palma de Mallorca, Spain, <sup>5</sup>Escuela de Química, Centro de Investigaciones en Productos Naturales (CIPRONA), Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica & Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas (CENIBiot), CeNAT-CONARE, San José, <sup>6</sup>Dept. of Biological Sciences, University of Alberta, Edmonton, Canada, <sup>7</sup>School of Biological Sciences, University of Essex, Colchester, UK, <sup>8</sup>Australian Institute of Marine Science, Townsville and Australian Centre for Ecogenomics, University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia, <sup>9</sup>Hawkesbury Institute for the Environment, University of Western Sydney, Penrith, Australia, <sup>10</sup>Wisconsin Institute for Discovery, University of Wisconsin-Madison, USA, <sup>11</sup>Systems Biology Program, Centro Nacional de Biotecnología, CSIC, Madrid, Spain, <sup>12</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita (DISTAV), Università degli Studi di Genova, Italy, <sup>13</sup>Athena Institute, Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands, <sup>14</sup>Estación Experimental del Zaidín-CSIC, Granada, Spain, <sup>15</sup>Center for Microbial Ecology and Technology (CMET), Ghent University, Belgium, <sup>16</sup>Department of Microbiology, Radboud University Nijmegen, The Netherlands, <sup>17</sup>Institut Cochin INSERM U1016 - CNRS UMR8104 - Université Paris Descartes, Paris, France, <sup>18</sup>Department of Engineering Science, University of Oxford, UK, <sup>19</sup>Dept. of Pediatrics, University of California at San Diego, USA, <sup>20</sup>Department of Zoology, Molecular Biology Laboratory, University of Delhi, India, <sup>21</sup>Instituto de Tecnologia Química e Biológica. Universidade Nova de Lisboa, Oeiras, Portugal, <sup>22</sup>Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Republic of Korea, <sup>23</sup>Bioresources Unit, AIT Austrian Institute of Technology, Tulln, Austria, <sup>24</sup>Department of Life Science and Systems Biology, University of Torino. Italy, <sup>25</sup>Department of Biotechnology and Biomedicine, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, <sup>26</sup>Department of Microbiology and Immunology, National University of Singapore, <sup>27</sup>School of Molecular Cell Biology & Biotechnology, Tel Aviv University, Israel, <sup>28</sup>Dept. of Medical Microbiology, Ankara University, Turkey, <sup>29</sup>Institut de Microbiologie Fondamentale, University of Lausanne, Switzerland, <sup>30</sup> Department of Clinical Microbiology, Haydarpaşa Numune Training Hospital, Istanbul, Turkey, <sup>31</sup>Society for Applied Microbiology, London, UK.

# 사회의 미생물학적 지식에 대한 절실한 필요성

번역: 최유진, 최소영, 채동언, 안정호

Translated by Dr. Yoojin Choi, Dr. So Young Choi, Dr. Tong Un Chae, and Dr. Jung Ho Ahn

## 요약문

미생물과 미생물의 활성은 인간과 전체 생물계, 그리고 사실상 지구 상의 모든 표면과 대기에 존재하며, 매우 강력하면서도 일반적으로 그 기능에 긍정적인 영향을 주어, 건강과 복지에도 영향을 미친다. 집단적으로 그리고 광범위하게 태양과 협력함으로써, 미생물은 생물권의 생명 지지 체계로 작용한다. 이러한 특성 때문에 매일의 생활에서 개인과 가족들이, 그리고 공동체와, 국가와 지구의 건강 평가와, 기획과 관련 정책의 수립에 참여하는 개인과 책임자들이 결정을 내릴 때 미생물을 합당하게 고려하는 것이 필수적이다. 하지만, 인류에 전반적인 영향을 미치는 다른 주제들, 예를 들어 재정 문제, 건강 및 교통 등에 대해서는 전반적 이해도가 높은 반면, 관련된 미생물 활성에 대한 지식, 즉 미생물이 우리 생활에 어떻게 영향을 미치는지, 그리고 인간의 유익을 위해 미생물을 어떻게 이용할 수 있는지에 관한 지식, 말하자면 *미생물학적 지식*은 일반인들에게 부족한 상태이며, 이는 의사 결정자의 역할을 하는 집단들에서도 마찬가지이다. 미생물 활성과 관련된 결정들은 종종 이해하기 힘들고, 이용 가능한 정보도 때때로 편향되어 있으며 일반적으로 불충분하기 때문에 상당한 불확실성이 생겨난다. 그 결과, 심지어 증거에 기반한 '최상의' 결정들조차도 예측하지 못했고, 의도치 않았으며, 때로는 바람직하지 않은 결과로 이어지는 것이 드문 일이 아니다. 따라서, 정보에 기반한 개인적 의사 결정, 정부와 기업들의 정책 개발, 그리고 정책결정과 관련된 사회적 이해 당사자에게 지식을 제공함에 있어서, *미생물학적 지식*이 우리 사회에 필수적이라고 우리는 주장한다. 핵심적 미생물 활성에 대한 이해는 아동에서 성인으로 성장하면서 학교에서 배우는 다른 주제들만큼 필수적인 것이며, 따라서 학교 교육을 통해 습득해야 한다. *미생물학적 지식은 세계 시민으로서 살아가기 위해 필수적인 기술에 포함되어야 한다.* 교육 과정에 *미생물학적 지식*을 포함시킴으로써 사회 내에서 이를 빠르게 습득할 수 있도록 하기 위해, 우리는 본 논문에서 유치원부터 고등학교까지 모든 연령 대에 적용 가능한 기본 교습 개념과 양식을 제안하며, 미생물 활성이 매일의 삶에 영향을 미치는 방식, 인간과 지구가 직면한 거대한 도전들, 그리고 지속가능성과 지속 가능한 개발 목표의 맥락에서 핵심적인 미생물 활성 관련 내용들을 검토한다. 우리는 미생물학자들, 미생물학을 공부한 공동체들, *미생물학적 지식*을 갖춘 교수들에게 기본 개념을 발전시키는데

도움을 주고, 어린이들에게 친숙하고 호소력 있는 교수 도구들과 재료들을 개발하기 위한 재원을 마련하고 찾아주며, 그 효과를 증가시키며, 가장 중요한 것으로서, 교육자들, 정책 입안자들, 기업주들 및 관련 정부 및 비정부 기관들을 설득하여 이 운동을 지지하고 추진하도록 함으로써, 이 운동에 참여하고 공헌해 줄 것을 촉구하는 바이다. *사회 내 미생물학적 지식*은 반드시 현실화되어야 하는 목표이다.

## 본문

**미생물 및 생물체.** 미생물 공동체는 모든 *육안적생물* (동물과 식물)의 환경과 접촉하여 본질적으로 모든 표면에 두 번째 껍질을 형성한다. 이러한 미생물 표면은 상피 표면의 물리적 및 화학적 장벽 기능 (예: 병원체 공격)을 보강하는 동적이고 생태학적 장벽을 추가로 구성한다. 그러나, 그러한 미생물 공동체는 그들의 장벽 활동 외에도 숙주와 다면적인 상호작용을 하고, 필수적인 기능을 제공하며, 숙주 파트너들의 안녕과 생물학적 특성에 광범위한 영향을 미친다. 예를 들어, 식물과 관련된 미생물은 성장을 위해 질소를 포함한 필수 미네랄의 획득을 중재하고 (실제로, 미생물에 의한 질소 고정화가 없었다면, 1차 생산자인 식물들이 동물의 증식과 진화를 위한 충분한 바이오매스 생산을 하지 못했을 것이다), 감염으로부터 보호하며, 식물 성장을 촉진하는 호르몬과 같은 화합물을 생산한다. 식물에 의해 운반되는 일부 미생물은 동물에게 독성을 나타내기 때문에 포식자에 대한 식물 방어의 기능을 한다. 미생물은 동물을 질병으로부터 보호하고, 소와 같은 반추 동물에서 음식을 발효시키고, 곤충을 위해 음식을 소화시킨다. 본질적으로 모든 미생물은 표면 미생물 공동체로 덮여 있는 반면, 어떤 것들은 숙주 세포 안에 사는 소위 내공생 미생물을 포함하고 있기도 한다. 내공생 미생물은 곤충 (숙주의 성별을 결정할 수 있는 곳), 해면 및 식물, 원생 동물과 같은 다른 미생물과 같은 다양한 유기체의 생활주기에서 중요한 역할을 한다. 광합성 유기체에서 태양 에너지(색소체)를 채취하는 역할을 하는 세포내 기관, 그리고 대부분의 유기체에서 에너지 생성(미토콘드리아)을 담당하는 세포내 기관들은 내공생 미생물로부터 진화하였다. 생물체의 미생물 구성 성분인 이른바 마이크로비옴은[마이크로비옴: '물리·화학적으로 구분되며 뚜렷한 이유를 가지고 서식지를 점령하는 특징적인 미생물 군집. 따라서 이 용어는 관련된 미생물을 지칭할 뿐만 아니라 활동 범위를 포함한다. (Whipps 외, 1988)], 생물체의 정체성과 환경생리학의 필수적인 특징이다: 세균이 없는 동물과 식물은 그들을 부적합하게 만들고 그들의 자연 서식지에서 살아남을 수 없게 하는 결함이 있는 개발 프로그램을 가진 실험실 변종들이다. 미생물과 숙주로 구성된 통합 된 전체를 생물체라고 부른다. 소위 '*장내 미생물 불균형*'으로 이어지는 미생물의 변화는 벌의 장내에 있는 미생물의

제초제 글리포사테가 유발하는 섭리에서 증명되듯이 숙주와의 관계를 방해하고 안녕에 기여하는 기능을 교란시켜 병원체 민감도가 증가될 수 있다 (Motta 외, 2018).

**인간의 50%는 미생물이다.** 인간 생체는 세포 수 측면에서 50% 미생물이다 (Sender 외, 2016). 인간의 장내 미생물은 우리의 음식 섭취량의 대부분을 소화시키고 우리가 동화하여 이용할 수 있는 형태로 영양분을 방출하고, 우리가 스스로 만들 수 없는 필수 비타민, 아미노산 및 기타 미량 영양소를 공급하고, 호르몬과 같은 화합물을 만들어 제 2의 내분비계로서 작용하며 (Brown and Hazen, 2015), 그리고 현재 다양한 신체 및 정신 질환에서 역할 하고 있다 (Wang 외, 2017; Du Toit, 2019). 인간의 미생물 장내 미생물 불균형 현상의 전형적인 예는 항생제에 의한 장내 미생물 공동체의 작은 변화로서 *Clostridium difficile* 균이 우위를 차지하여 가막성 대장염을 일으킨다 (Bartlett, J.G., 1979). 우리가 태어날 때부터 죽을 때까지 미생물 동반자들과 친밀하고 역동적이며 상호 이익이 되는 관계에 살고 있다는 것을 인식하는 것은 매우 중요하며, 중요한 범위는 무엇을 어떻게 그리고 우리가 무엇이고 그리고 누구인가 (물론 그들이 누구인가)를 명시하는 것이다. 데카르트를 인용하자면: 나는 생각한다, 고로 나는 존재한다.

우리는 우리의 가장 친하고 영향력 있는 동반자에 대해 본질적으로 아무것도 모르는 상태에서 우리가 얼마나 잘 알지 못하고 우리의 관계를 믿을 수 있는지에 대해 조바심을 낼지도 모른다.

- 미생물 동반자들이 하는 일,
- 그들의 활동이 우리에게 미친 영향,
- 우리의 미생물 동반자들과 그들의 활동이 우리가 하는 일에 어떻게 영향을 미치는지, 그리고
- 상호 이익을 위해 동반 관계를 개선할 수 있는 방법

**인류에게 봉사하는 미생물.** 미생물은 개인적으로 우리에게 영향을 미칠 뿐만 아니라 초기에는 발효 식품 및 음료 (맥주, 와인, 발효유 제품), 발효 빵, 결합 재료 (아마 침지), 토양의 비옥함 유지 (질소 고정 박테리아가 포함된 콩과 식물에 이용 및 미생물 바이오매스를 이용한 수정) 그리고 그 후, 가정 및 산업 폐기물의 저하를 통한 오염의 감소, 깨끗한 식수 공급을 제공한다. 특히, 음식물을 보존하고 영양 상태를

개선하고 나중에는 인간이 버린 폐기물을 미생물로 처리하고 병원균 부하를 감소시킴으로써 위생을 개선하는 식품의 발효는 문명의 부상과 품질 및 인간 삶의 수명에 크게 기여했다.

최근 들어 미생물들이 급성장하고 있는 바이오 경제의 중심 단계에 들어섰다 (Timmis 외, 2017 참조). 동시에, 4차 산업혁명으로 일컬어 지는 세계 경제 틀에 큰 변화가 있었다. 무한 연결, 인공지능, 대용량 감지, 빅데이터 처리, 로봇 공학 및 기타 많은 기능과 함께, 4차 산업혁명은 폐기물이 없고 유해한 배출물이 없으며 모든 것이 재활용되는 순환적 경제 상황에서 상품의 지속 가능한 생산을 계획하고 있다 (예, Nielsen, 2017 참조). 미생물 기반의 과정은 극한 조건, 높은 에너지 입력 및 독특한 시약이 필요하지 않기 때문에 4차 산업 혁명에 이상적으로 적합하다. 생산된 새로운 물질 및 폐기물과 관련 반응 물질은 일반적으로 쉽게 재활용 된다. 그 결과, 이전에는 화학 공정에 다소 한계적 보완이었고, 소수의 고/부가가치 생물 활성 분자의 생산에 초점을 맞춘 미생물 생체 촉매 반응에 의한 화학 전환이, 재생 가능한 원료를 기반으로 대규모 화학 전환하여 진정한 환경 친화적 대안으로 부상하게 되었다. 이러한 발전의 중심에는 세포 공장 (대부분의 미생물)과 그것으로부터 얻은 효소가 있는데, 자연적이거나 재구성된다.

미생물 촉매 반응과 더불어 현재 미생물 기반 생산 과정의 방대한 범위를 나타내는 지표들은 아래를 포함한다.

- 다양한 음식 (요거트, 치즈, 청국장, 단세포 단백질, 초콜릿, 피클, 프로바이오틱스 등), 식품 향신료 (바닐라, 간장, 김치 등), 식품 보충제 (비타민, 아미노산 등) 의 제조
- 의약품, 백신, 진단 및 바이오 센서 모니터링 시스템 및 개인 위생용품 생산
- 농작물 재배 보호 및 증진
- 다양한 화학물질과 바이오 소재 생산을 위한 발효 (바이오플라스틱, 생물학적 셀룰로오스)
- 전기 합성과 같은 친환경 화학 공학, 그리고 화학 합성을 위한 재료로서 온실 가스인 이산화탄소의 사용
- 에너지 생산 (바이오 가스, 미생물 연료 전지)
- 천연 자원의 회수 (금속 및 산업체에서 생물학적 회수)
- 폐수 흐름 및 오염 된 지역의 생물학적 정화
- 역사적 문화유산 대상(기념물, 동상, 프레스코, 그림, 문서)의 생물학적 정화-생물학적 복원, 생물학적 보존

또한, 개발중인 새로운 응용들이 있는, 예를 들면, 미생물의 장내 미생물 불균형 (가막성 대장염, 염증성 장질환, 비만, 당뇨병, 다양한 심리적 상태; Rossen 외, 2015 참조)에 의해 야기되는 질병에 대한 미생물 치료법, 높은 수준의 생산/활동을 위해 합성 생물학적으로 재 구성된 세포와 생물체들, 생태계 수준의 생물 공학 등이 있다. 미생물의 놀라운 대사 다양성은 대량 및 특수 화학 물질과 재료의 지속 가능한 생산을 위한 새로운 기회를 지속적으로 창출한다 (Lee 외, 2019).

미생물 활동의 새로운 기회를 적시에 인식하고, 유익성과 가능한 위험을 정확하게 평가하며, 활용을 촉진하는 데 필요한 조치에 대한 증거 기반 결정을 내리는 능력은 지식 기반, 생물 중심 경제가 경쟁력을 갖추고 지속 가능한 경제로 크게 발전하기 위해 필수적이고 지속 가능한 실천으로 크게 진보해야 한다. 핵심 이해 관계자인 일반 대중을 포함하여 의사 결정 과정의 모든 단계에서 기본적인 미생물학에 대한 적절한 지식을 절대적으로 필요로 한다.

*근본적인 미생물학적 과정에 대한 지식을 바탕으로 한 정책 결정은 미래의 진보, 안녕, 지속가능성의 달성 및 문명화의 진보를 위한 기초가 될 것이다. 우리 미래 진보의 신속성과 방향은 우리의 약속의 정도에 달려 있다.*

- *미생물학적 과정을 신비롭게 탐구하고 그에 따라 잠재적이고 새로운 미생물을 기본으로 한 응용을 예측하고 식별할 수 있는 역량을 지속적으로 발전시킨다<sup>1</sup>,*
- *인간과 지구의 안녕을 위해 새로운 응용을 적절히 활용한다,*
- *현대적 응용처들을 확장하고 개선한다, 그리고*
- *관련 연구, 개발 및 상업화 활동을 장려하고 촉진하며 관련 이해관계자 선호도를 적절히 통합하는 알맞은 증거를 기반으로 한 의사결정 및 자원 할당 시스템을 설계한다.*

<sup>1</sup> 새로운 발견은 연구의 결과이다. 그러나, 연구는 어느 정도 초학문적 자연의 발견에 장애가 되는 관련 학문의 분야와 그룹에 조직되어 있다. 중요한 것은 환경 보호, 인간 건강 및 식품 보안에 필요한 많은 변화들은 초학문적 연구 계획 및 시행을 필요로 한다는 것이다. 미생물학은 그 성격과 응용이 매우 광범위하고 생명체와 지구에 미치는 영향에 만연하기 때문에, *미생물학적 지식*은 연구자들을 본질적으로 더 학문적으로 만들 것이다. 이것은 현재 우리가 직면하고 있는 여러 가지 중대한 환경/보건 문제에 대한 혁신적인 해결책 및 관리 옵션의 개발을 가속화할 것이다.

**미생물은 전반적으로 우리에게 개인적으로 또는 집단적으로 큰 영향을 미친다.**

미생물은 우리 삶에 많은 영향을 미칠 수 있고, 따라서 우리가 하는 많은 개인적인 결정과 관련이 있다. 예를 들어, 제왕절개(무균성)에 의한 출산이나 자연 분만(모성 미생물에 의한 신생아 집단화; Wampach 외, 2018), 모유 수유 (병원균에 대한 보호 항체 제공, 면역 체계의 건강한 발달을 조율하는 것으로 생각되는 비피더스균을 선호하는 모유 올리고당류 [Gomez de Agüero, 2016; Moossavi 외, 2018], 모유 등에 존재하는 모계 미생물 등 [Milani 외, 2017]), 강력한 소독제의 자주 사용하여 집을 청소하거나 (유아의 미생물 다양화에 대한 노출 감소 및 건강상의 이점: Finlay and Arrieta, 2016; Gilbert and Yee, 2016; Bach, 2018; Sharma and Gilbert, 2018; Caselli, 2017 참조), 백신을 맞거나 감염 치료를 받고 (Lane 외, 2018), 인이 함유된 가정용 세정제품을 사용 (Richards 외, 2015; 지역 해역에서 부영양화 및 유해한 녹조 현상에 기여할 수 있음), 살균 비누 사용 (피부 미생물 군집 불균형을 일으킬 수 있음, Gilbert and Yee, 2016), 반려견을 동반하고 (미생물 교환을 촉진, Trinh, 외, 2018; 인 방출을 증가, Hobbie 외, 2017), 또는 먹을 음식(예: 상당한 메탄 발자국이 있는 소고기, 암과 상관관계가 있는 소고기 및 유제품의 소비, 기타 육류 및 야채: 출처, 유통 기한, 알려진 위험 요소와의 연관성 등)을 선택한다.

이는 휴가 및 여가 활동이라는 단 하나의 활동으로 인해 다양한 감염과 감염에 노출될 수 있다는 점을 감안한 예시일 수 있다. 미생물에 의한 질병, 우리의 생명을 위협하는 질병은 우리 가정 환경에 없거나 덜 퍼져 있을 수 있다.

- 목욕, 신선한 바닷물 (*Cryptosporidium*, *Vibrio vulnificus*, *Leptospira* 등), 그리고 부적절한 염소 처리된 수영장, 특히 뜨거운 욕조 (*Mycobacterium*, *Pseudomonas*, *Legionella*, *Candida*, *Trichophyton*, *Giardia* 등),
- 특히 해산물 (예: *Salmonella*, *Vibrio*, EHEC, *Campylobacter*, *Listeria*, *Norovirus*, hepatitis viruses 및 다양한 기생충 등)을 먹거나 조리하지 않거나 오염된 식품, 심지어 열에 안정적인 독소 (치명적인 적조 신경독 및 여러 가지 진균독 포함)를 포함하는 적절하게 조리 된 식품,
- 식수, 오염된 액체 (물, 과일주스 등)
- 새로운 파트너와의 성관계 (전형적 STIs, HIV 등),
- 황열병, 말라리아, 지카바이러스, 뎅기열 등과 같은 감염원들이 유행할 수 있는 휴가 목적지의 선택 그리고,
- 유람선을 포함한 숙박 시설과 여가 시설의 선택 (*Cyclospora*, *Norovirus*, *Legionella*, *Mycobacteria*).

예측 가능하고 의도된 결과를 초래할 가능성이 높은 효과적인 결정을 개인적이든 정책적이든 간에, 우리는 어떤 미생물 활동이 관련되며 이러한 활동이 실행에 어떤 영향을 미칠 수 있는지 알아야 한다. 우리 삶의 일상적인 결정은 기본적인 이해에 의해 알려질 필요가 있다.

- 우리의 행동으로 인해 부정적인 결과가 초래될 수 있다, 그리고
- 우리와 다른 사람들에게 그러한 결과를 피하거나 완화시키기 위해 우리가 행동을 수정할 수 있는 방법.

**미생물은 광범위하고 지대하게 생물권 전체에 영향을 미친다.** 미생물은 약 40 억년 전에 발생한 생명체의 최초의 형태이자, 인간과 다른 생명체들이 사라지고 나서도 계속해서 지구 행성에 거주하는 미래 생명체이다. 보이지 않는 미생물의 세계는 우리에게 친숙한 눈에 보이는 생명체들보다 훨씬 더 넓은 진화적, 대사적 다양성을 보여준다. 바이오매스 측면에서, 해양 생물 중 90%가 미생물이다. 광합성 해조류와 cyanobacteria 가 해양 플랑크톤의 주를 이루고, 해양 먹이 사슬의 기초를 담당한다. *Prochlorococcus* 나 *Synechococcus* 는 매년 약 100 억 톤의 탄소를 대기에서 제거하는데, 이는 해양에서 이루어지는 전체 탄소 고정의 약 3분의 2에 해당한다. 미생물은 대기 중 온실가스의 배출에 근본적으로 영향을 미치는 전지구적 및 국지적 생화학 과정을 규제하여, 기후 변화에 영향을 줄 뿐만 아니라 인간, 동물, 식물, 토양, 물 공급의 건강도 조절한다. 미생물은 우리가 숨쉬는 데 필요한 산소의 50%를 발생시킨다. 초기 미생물은 산소를 생성하여 산소를 사용하는 모든 유기체가 진화할 수 있게 하였고, 또한 깊은 바다에서 육지로 생명체가 이동할 수 있게 만든 오존층을 만들었다. 그것들은 이 행성의 최고의 쓰레기 재활용기 및 재생기라 할 수 있다. 미생물은 어디에나 있으며, 그 활동은 지구상의 모든 생명체의 질을 유지시키고 생명체에 영향을 미친다. **그것들은 생물권의 생명유지 시스템이다.** 비록 우리 인간은 우리 자신을 지구 건강의 관리자라 여기지만, 미생물이 훨씬 더 강력하게 행성 활동의 영향, 규제, 변화를 담당한다. **최후에:** 만약 영양소 순환에서 중요한 과정을 수행하는 미생물군들이 생물권으로부터 사라지게 되고 기능적으로 동등한 다른 집단으로 교체할 수 없다면, 우리가 알고 있는 지구상의 생명체는 존재하지 않을 것이다<sup>2</sup>. 세계

<sup>2</sup> 처음에는 이 개념이 (특히 모든 미생물이 어디에나 있다는 아래의 다른 진술과 결합하여) 다소 억지스러워 보일 수 있으나, 다음 사항에 대해서 곰곰이 생각해 볼 만하다: 환경-서식 조건의 변화, 예를 들면 지구 온난화가 그 환경에 거주하는 생명체에게 (주민) 더 이상 적합한 환경이 아니게 만든다면, 그 주민들은 (1) 더 살기 좋은 서식지로 이주하거나, (2) 새로운 조건에 맞춰 새로운 특성들을 적응 진화시키거나, 또는 (3) 죽게 되는데, 만약

환경의 마이크로바이옴 (microbiome)은, 그 활동성과 규모 면에서, 산업활동, 집약 농업, 인구과잉으로 인한 오염 배출의 영향을 되돌리는 데에 우리가 의지할 수 있는 유일한 협력자일 것이다 (de Lorenzo 외, 2016)

우리는 미생물이 행성의 활동 과정과 건강에서 하는 중추적인 역할을 총체적으로 인식하고 미생물이 무엇을 하고, 또 무엇을 할 수 있는지에 대한 지식을 습득하여 우리 행성의 건강의 공동 관리를 위한 효과적인 파트너십과 전략을 개발할 수 있도록 하는 것이 필수적이다. 이를 위해 우리는

- 미생물이 매개하는 영양소 순환, 행성의 기능, 생물권의 건강 사이의 정교한 균형을 제대로 알고 이해한다.
- 생물권 기능에 중요한 역할을 하는 미생물들에 대해서 (고의가 아니더라도) 악영향을 미치지 않도록 한다.

**미생물의 활동을 활용하는 것은 몇 가지 중요 과제를 해결하고 지속 가능한 개발 목표를 달성하는 데 중요하다.** 인류는 현재 식량, 깨끗한 물, 건강 관리, 교육, 에너지 및 원자재 이용에 대한 불균형, 지속적인 빈곤, 지구 온난화로 인한 해수면 상승과 그로 인한 거주 지역 감소, 사막화의 중요 문제에 직면해 있고, 이것들은 중요 과제의 일부이다. 인류와 지구가 요구하는 것, 그리고 이러한 요구를 지속 가능한 방법으로 충족시키기 위한 행동 계획은 유엔 지속가능 개발 목표에 자세히 설명되어 있다. (SDGs; United Nations, (2015) Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>)).

2017 년에 발행된 미생물생명공학지 (Microbial Biotechnology) 최신호에서는 지속적으로 성장하는 세계 인구의 식량 공급 문제 (Trivedi 외 2017; Garcia 외 2017),

---

지리적으로 한정되어 있다면 아마도 멸종될 것이다. 진화는 빠르게 번식하는 유기체에 의해 가장 쉽게 영향을 받는다. 그러나 생물권의 여러 서식지에 있는 미생물들은 극히 느리게 번식한다. 만약 변화가 급격하게 이루어진다면, 그들이 소멸될 것으로 생각된다. 만약 이 중 중요한 생물권 기능을 담당하는 집단에 속하는 것이 있다면, 심각한 결과를 초래할 수 있다. Curtis (2006)는 이를 다소 날카롭게 표현했다: ‘...만약 마지막 흰긴수염고래가 마지막 팬더 위에서 질식사했다면, 그것은 재앙이겠지만 세상의 종말은 아니다. 하지만 만약 우리가 실수로 마지막 두 종의 암모니아-산화균을 독살했다면, 그것은 또 다른 문제가 된다. 지금 일어나고 있을 수도 있고 우린 알지도 못할 것...’

온실 가스 생산, 지구 온난화 및 부정적인 결과 일부, 그리고 세계 천연 자원의 소비의 지속가능성을 극대화하는 이용 (예시, Verstraete & de Vrieze, 2017; de Lorenzo, 2017) 등을 개선하여 지속 가능한 개발 목표 달성에 기여하거나 잠재력을 보여주는 미생물 기술의 범위를 살펴보았다. 또한 신기업, 고용 및 부와 관련된 다른 지속 가능한 개발 목표인, *지속 가능한 경제 성장과 고용창출*에 대한 생명경제학적 측면 (Timmis 외, 2017) 및 다른 측면에서 본 미생물 생명공학의 뛰어난 잠재력에 대해서도 다루었다. 같은 학술지에서, 2017 년과 2018 년에 *새로운 기업 및 일자리 창출의 원천으로서의 마이크로바이옴 (The microbiome as a source of new enterprises and job creation)*을 제목으로 하는 일련의 논설을 통해 새로운 기업과 고용 기회를 창출하기 위한 마이크로바이옴 기술의 능력에 대해서 분석하였다.

*중요 과제 해결과 지속 가능한 목표 달성을 위한 긴 여정에서 실행되어야 하는 많은 조치들은 미생물 과정을 수반할 것이다. 주요 정책 결정은 실행/유지 /기여를 높이기 위해 필요한 주요 정책 결정에는 미생물 활동 관련 및 이러한 것들이 어떻게 최대의 유익한 효과를 내도록 구성될 수 있는지에 대한 지식이 필요하다.*

**근본적인 미생물 과정의 지식에 근거한 결정은 경우에 따라서 큰 세계적 재앙을 막을 수 있다.** 미생물은 행성 및 생물학적 진화의 중심 주체이자 핵심 이해당사자들이다. 관련 프로세스에 대한 미생물의 기여에 대한 적절한 인식, 지식 및 고려가 없고, 미생물이 어떤 의도된 변경에서 수행할 수 있는 역할을 고려하지 않는 계획은 정책 개발 및 수행의 모든 단계 (국제, 국가, 지역 및 개인)에서 위험을 수반하거나, 차선, 또는 비효율적인 결과를 내거나, 최악의 경우 역효과를 초래한다. 의사결정 및 의사 결정 결여에 의해 부정적인 영향을 받는 잠재적으로 예방할 수 있는 재해의 몇 가지 예는 다음과 같다:

*항생제 내성 위기.* 이미 1960 년대와 1970 년대 초반, Falkow (Falkow 외, 1961; Falkow 1970, 1975), Watanabe (Watanabe, T, 1963; 1966), Levy (Levy 외 1976; Levy, 1982)와 같은 대표적인 미생물학자들이 항생제의 과잉 처방과 비임상적 사용으로 인한 항생제 내성의 발생과 확산에 대해 경고했다. (사실, 페니실린의 발명자인 Alexander Fleming 이 1945 년 그의 노벨상 강연에서 이미 그 위험성에 대해 경고한바 있다: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/fleming-lecture.pdf>). 이후 양식업에서의 항생제 사용을 포함하여 (예: Cabello, 2006) 유사한 경고가 반복적으로

대두되었지만, 별 소용이 없었다. 오늘날 우리는 항생제 내성을 의학에서 가장 중요한 문제 중 하나로 여긴다. 이는 지금은 치료가 불가능해진, 이전에는 치료가 가능했던 생명을 위협하는 감염병들을 증가시키고 있기 때문이다.

([http://www.wpro.who.int/entity/drug\\_resistance/resources/global\\_action\\_plan\\_eng.pdf](http://www.wpro.who.int/entity/drug_resistance/resources/global_action_plan_eng.pdf)). 2050년까지 항생제 내성이 초래할 위험은 다음의 국제 보고서를 통해, *전 세계적 약물 내성 전염병 해결: 최종 보고서 및 권장 사항* ([https://amr-review.org/sites/default/files/160518\\_Final%20paper\\_with%20cover.pdf](https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf)), 누적 100 조 달러의 비용을 소모하며, 그렇지 않으면 천만 명의 예방 가능한 죽음을 초래한다고 예측되었다 (흥미롭게도, 4 가지 권고사항 중 첫 번째는 특히 어린이와 청소년들을 대상으로 한 *글로벌 대중 의식 캠페인 (Global public awareness campaign)*의 필요성이다. 그 캠페인은 연간 40-100m 달러의 의 비용이 들었지만, 그 권고 캠페인은 기초 교육을 포함하지 않았다). 그럼에도 불구하고, 동물 사육과 양식업에서 비임상 항생제의 사용은 2010-2030 년 동안 67% 증가할 것으로 예상된다 ([https://amr-review.org/sites/default/files/160518\\_Final%20paper\\_with%20cover.pdf](https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf)).

만약 보건 당국, 정치인과 재계 지도자들 (그리고 결정적으로, 일반 대중들)이 미생물이 빠르게 진화하고, 그들의 환경 변화에 대응한 새로운 기능을 전파하는 능력을 가지고 있음을 인지하고 있고 - 이 경우, 강력한 항균성 물질을 대규모로 환경에 도입 - 그러므로 Falkow 외의 경고에 감사할 수 있었으면, 우리는 오늘 매우 다른 상황에 놓여 있었을 것이다.

*사실상 퇴치된 소아 질환의 복귀.* 홍역, 백일해 (백일기침), 디프테리아의 재발은 완전히 막을 수 있었으나, 백신과 관련된 위험성과 기초 미생물학의 근본적인 이해 부족, 근거가 부족한 개인의 선택 등이 반영된 예방접종의 수용 및 적용 범위 감소가 - 백신 접종 기피- 실질적으로 이러한 질병들을 퇴치하였던 나라에서 일어나고 있다 (Lane 외, 2018).

*알레르기의 증가.* 심각한 소아 감염병들은 반드시 치료가 필요하지만, 가벼운 미생물 감염 및 여러 환경 미생물에 대한 적절한 노출은 유아의 건강한 면역체계 개발을 촉진하는 것으로 여겨진다 (Bach, 2018). 미생물공포증 (세균공포증)의 증가와 안전한 가정환경을 만들기 위해 모든 미생물이 나쁘고 반드시 제거되어야 한다는 인식을 심어주는 광고 캠페인은 현재 우리 사회의 폭발적으로 증가한 면역 기능 장애에 (예를 들면, 알러지, 천식, 습진과 신경질환까지도) 크게 기여했을 수 있다. 실제로 최근에는 피부 미생물들의 피부암에 대한 보호 효과가 강한 효과의 항균성 비누를 사용시 감소하는 것으로 나타났다 (Nakatsuji, 외 2018). 어떤 결과들은 병원체

부담을 줄이기 위한 위생적 관행과 건강한 미생물군을 유지하는 전략의 균형을 유지할 필요가 있다는 교육을 제공하는 등의 적절한 조치가 취해진다면 개선될 수 있었다. 이는 토양, 동물, 식물로부터의 미생물과의 접촉으로부터의 효과적인 면역 체계 교육을 포함하여 중요한 환경생리학적 서비스 제공한다 (Finlay & Arrieta, 2016; Gilbert, Knight & Blakeslee, 2017).

*온실 가스 위기.* 미생물은 온실가스를 생산하고 소비한다 (Caviccioli 외, 제출됨), 그래서 미생물의 배출을 줄이며, 한편으로는 미생물의 온실가스 소비를 늘리려는 노력이 중요하다. 미생물 관여를 고려 시, 양적 측면과 프로세스가 선형적이지 않을 수 있다는 사실을 이해하는 것이 중요하다. 미생물과 식물에 의한 온실가스 CO<sub>2</sub>의 고정 속도는 사람에 의한 화석연료의 연소로부터 발생하는 것에 비해 느리다. – 물질 순환 주기는 불균형 – 이것이 CO<sub>2</sub> 수치가 빠르게 상승하는 이유: 우리의 식물 및 미생물 친구들이 인간의 활동에 따라가지 못한다. 온실 가스 배출은 지구 온난화를 초래하며, 영구 동토층이 녹는 원인이 되고, 새로운 미생물에 의한 메탄과 이산화탄소의 생산을 만든다. 따라서 화석 연료 소비의 결과를 증폭시키고 악화시킨다.

특히 반추동물을 이용하는 식용 고기의 생산은 많은 양의 온실 가스인 메탄 방출을 수반하는 것으로 오래전부터 알려져 왔다. 육류 생산은 그 자체로 사료 생산에 기반을 두고 있으며, 이는 다시 질소 비료 사용과 관련이 있다. 요소는 토양 미생물에 의해 암모니아와 온실 가스인 이산화탄소로 분해되는데, 질소 비료로서 농업에서 오랜 기간 널리 사용되고 있다 (현재 단계적으로 폐지되는 실정이지만). 다른 질소 비료는 미생물이 극도로 강력한 온실 가스인 N<sub>2</sub>O를 생산하게 만든다 (그리고 또한 부영양화를 일으키는데: 이는 인접한 수로에서 유출된 액체의 영양분이 해로운 해조류의 번식을 유발하여 물고기가 죽거나, 저산소증을 일으키고, 수역의 사용에 제한이 시행됨). 중요한 개인적, 정책적 결정은 여전히 식단 영양 필요분을 초과하는 육류 생산량과 소비량에 대해 이루어진다.

해안 수로로의 영양소 유출은 거주하고 있는 마이크로바이오타에 의한 산소 소비량을 빠르게 증가시켜 산소 최소 구역의 급속한 확장에 기여한다. 기후 변화, 생물 다양성 손실, 오존 파괴 등 지속 가능한 미래를 위한 9 가지의 지구위험한계를 식별하는 과정에서, 질소 주기가 가장 심각하게 손상된 경계로 확인되었다 (Rockström 외., 2009). 이는 인간이 만든 비료가 현재 생물권에 중요한 영양소를 제공하는 데 필요한 모든 자연적 과정에 비해 월등히 효율적이기 때문이다. 따라서 현재 많은 국가에서 이러한 비료의 사용을 제한하는 것을 고려하고 있지만, 성장하는 세계 인구를 먹여야하고 또한 농업 사업과 그의 공급망과 동떨어져있는 사회의

빈곤층을 위해 위해 저렴한 가격으로 식량을 생산할 수 있어야 하기 때문에 여러가지 논쟁이 있다. 토양 질소 함량과 농작물 생산성 사이의 관계를 누구보다 잘 이해하고 있는 농민들이 의사결정과 건전한 정책을 주도하도록 장려해야 할 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고 질소 비료와 관련된 온실가스 배출 문제에 미생물이 관여하는 것은 개인적, 정책적인 토론/결정 과정의 주요 요소가 되는 경우는 거의 없으며, 이는 이러한 논의들을 의미있고 효과적으로 만들기 위해 꼭 필요하다. 좀 더 일반적으로 보자면, 온실 가스 배출량을 제한하는 최근의 정책 결정은 주로 인공 배출물을 다루고 있지만 근본적으로 미생물이 CO<sub>2</sub> 외에 N<sub>2</sub>O 및 CH<sub>4</sub> 를 포함한 상당한 양의 온실 가스의 생산과 소비 모두에 중추적으로 관여하고 있다는 사실을 무시하고 있다. 어쨌든 우리는 모두 지구 온난화로 인해 다양한 방식으로 영향을 받으며 따라서 주요 이해 관계자이다. 예를 들자면, 지구 온난화는 병원균과 해당 균이 갖고 있는 벡터의 전지구적 분포를 변화시킬 수 있으며 이에 따라 면역학적으로 약한 인간 및 동물, 그리고 방어에 약한 식물들 사이에서 질병이 출현하게 되고, 이는 전염병이 확산될 가능성이 있다.

*토양 위기.* 토양은 우리의 피부와 같은 지구의 필수적인 요소이다. 이러한 토양은 식물의 성장을 지원하며 토양 기능을 특징짓고 또한 토양의 건강함을 결정하는 넓은 범위의 생화학 과정을 중재하는 수많은 동물과 미생물의 본거지다. 또한 토양은 수십억 명의 사람들에게 식수를 공급하는 대수층으로 확산되는 지표수를 여과한다. 그리고 토양은 귀중한 영양분과 지구의 대기에 비해 3 배나 많은 탄소를 가지고 있다. 그러나 지구의 토양은 급속히 침식되어 주로 개울, 강, 해양으로 흘러가게 되며 이러한 과정에서 영양분을 방출한다. 대부분의 나라들은 토양을 만드는 과정(암반기상)에서 생산되는 것보다 몇 배나 빨리 토양을 잃고 있다. 심지어 점점 더 심한 기상 현상들이 토양 침식 속도를 더 높이고 있다. 토양 미생물은 토양 구조와 안정성을 주는 접착제 역할을 하는 다당류를 생산하여 침식에 대한 저항을 증대시킨다. 21 세기 말 이전에 일어날 것으로 예측되는 지구의 많은 농경지로부터의 참담한 토양 손실은 세계 인구를 먹이는 데 필요한 식량을 생산하지 못하고, 우리의 수로를 오염시킬 방대한 양의 영양소를 방출하며, 지구 온난화를 증가시킬 탄소를 방출하는 결과를 가져올 것이다. 이 위기를 모면하기 위해서는 정책 입안자들은 미생물 활동이 토양 안정성을 향상시키는 지식을 잘 활용할 수 있도록 전략을 수립해야 한다. 이러한 일이 일어나도록 하기 위해서는 주요 이해당사자뿐만 아니라 전세계의 시민들 역시 이러한 문제의 심각성과 미생물의 사용 가능성을 잘 알고 있어야 한다. 그러나 이를 위해서는 *미생물학의 기본적인 이해*가 필수적이다.

*환경오염의 축적과 먹이사슬.* 미생물이 환경적 과정에 참여한다는 것뿐만 아니라 미생물이 무엇을 잘 하고 무엇을 덜 잘 하는지를 아는 것은 필수적이다. 역사적으로 미생물의 대사가 다재다능하다는 사실을 기반으로 이에 한계가 있을 가능성을 고려하지 않고 산업, 가정, 병원 등에서 배출되는 모든 오염물질을 처리할 것이라는 편리한 가정을 해왔다. 물론 미생물들은 수많은 범위의 유기물들을 분해할 수 있지만, 이러한 미생물의 신진대사는 때로는 매우 느릴 수 있다. 따라서 PCB와 다이옥신과 같이 생산이 금지된 후 수십년 동안이나 먹이사슬에 존재했던 독성 화학물질의 발견 및 현재 석유 화학에서 파생된 플라스틱 오염에 의해 입증된 것처럼 이러한 오염물질의 생산과 방출이 미생물의 분해 능력보다 빠르다면 그러한 물질은 축적되고 오염된다.

*최근 우리가 직면하고 있는 최후의 약물에 대한 저항의 병원균들의 확산, 토양 침식, 플라스틱 바다의 문제와 이로 인해 야생동물 건강에 미치는 영향, 그리고 음식물망에 있는 미세플라스틱 형성과 축적과 같은 일련의 심각한 문제들은 예측 가능했었으며, 아래와 같은 조치가 있었다면 상당수의 문제를 피할 수 있었을 것이다.*

- *정책 입안자들이 그들의 결정이 미생물학적 프로세스에 미치는 결과와 장기적으로 예상되는 결과를 이해할 수 있었다면, 그리고*
- *사회의 다양한 이해당사자들이 현재의 정책과 행동의 위험성을 인지할 수 있도록 더 일찍 권한을 부여 받았더라면*

**낮은 수준의 생물학적 활성 물질에 대한 만성 장기 노출 문제.** 여러가지의 중요 과제 중 특히 *생물학적 기본적 이해*와 관련되어 있는 것으로는 생물권의 생물학적 및 화학적 오염이다. 왜냐하면 이러한 이슈에서는 인간의 결정이 오염을 일으킬 수 있는 문제가 될 수 있음과 동시에 오염물질의 양을 줄이거나 해결하거나 재활용함으로써 오염을 해결할 수 있는 해결책이 될 수 있기 때문이다. 생물학적 오염, 특히 주요 교외와 관련된 배설물 오염은 고소득 국가에서는 기술적 결함이나 극심한 기상 현상으로 인해 가끔 문제가 발생하지만 대부분 통제되고 있으며 저소득 국가에서는 여전히 문제가 되고 있다. 그러나, 육류 생산을 위한 산업화된 동물용 조업은 항생제가 농축된 혹은 항생제에 내성을 가진 미생물과 병원균을 포함한 엄청난 양의 배설물이 만들어지고 있기 때문에 점점 더 이러한 문제를 해결하는 것이 어려워지고 있다. 이

폐기물의 일부는 혐기성 정화조에 있기 때문에 무해하지만, 일부는 여전히 위험이 될 수 있는 환경에 남아있다.

일반적으로 새로운 화학물질은 유통하기 전에 그의 독성 및 수명 주기가 평가되지만, 이러한 평가들은 특정 화학물질이 가질 수 있는 고유 위험과 거의 관련이 없으며 표준 모델에서 단기간에 걸쳐 검출할 수 있는 급성 독성 정보만을 제공한다. 가장 직접적으로 영향을 받는 생물에 대한 급성 독성 평가와 장기간에 걸쳐 나타나는 낮은 수준의 만성 독성 평가는 매우 어렵다. 많은 생물학적으로 활성이 있는 화학 물질들, 특히 약품 제조하는 공장, 병원 및 가정용 폐수에 있는 약품들은 매우 낮은 농도로 존재하며, 그들 중 일부는 폐기물 처리 시설을 제거되지 못하고 환경으로 유입된다. 여기에 더해, 일부 화학 물질은 자연에 존재하는 미생물들도 인해 환경 영향 평가에서 포착되지 않은 새로운 화학 물질로 분해될 수 있으며, 이렇게 만들어진 새로운 화학 물질은 기존 화학 물질과 다른 방식으로 독성이 있을 수 있으며 혹은 더 심하게는 훨씬 더 독성이 강할 수 있다. 이러한 화학 물질과 대사 물질에 대한 만성적인 낮은 수준의 잠재적인 인구 수준의 결과를 초래할 수 있다. 환경에 널리 분포된 화학 물질에는 내분비 교란제 (Monnert et, 2017)로써 인간과 다른 동물들 및 벌 (Godfray, 외, 2015; Christen, 외 2018)과 같은 꽃가루 매개자의 출산율 저하와 개체수 감소에 부분적인 책임이 있는 것으로 간주되는 크세노스트로겐이 있다.

또 한가지 더 훨씬 더 어려운 문제는 다양한 오염 화학 물질이 환경에서 함께 섞인 혼합물들의 경우 사람의 건강과 환경에 미치는 영향은 알려져 있지 않지만 의심할 여지없이 크다는 것이다 (특히 저농도에서 만성 노출이 되는 경우). 미생물은 그러한 많은 화학 물질들을 분해할 수 있는 능력을 가지고 있거나 혹은 그렇게 진화할 수 있기 때문에 환경으로부터 이러한 화학 물질들을 제거할 수 있는 주요한 요인이다. 그러나 미생물들은 (특히 낮은 농도로 존재할 때) 적어도 의미 있는 속도로는 다른 것들을 분해할 수 없으며 그리고 복잡한 혼합물에 있을 때는 더욱 그러하다.

요약하자면 비록 생물학적 및 화학적 오염이 매우 복잡하지만 이와 비슷하게 복잡한 미생물이 이러한 오염물들을 무해하게 만들 수 있기 때문에 현존하는 오염을 줄이는 유일한 방법은 관련 미생물 과정에 대한 우리의 이해를 향상시키고 그것들을 이용하는 것이다. 합성 미생물학을 사용하여 생산된 화학 물질을 포함한 새로운 화학 물질의 경우, 해당 화학 물질의 구체적인 수명 주기를 포함하는 책임 있는 설계가 필요하다. 하지만, 반복하자면, 미생물 세계가 어떤 한계를 가지고 있든지 간에, 그것은 우리가 지구의 오염에 대항하는 데 의지할 수 있는 유일한 방법으로 남아 있다 (de Lorenzo 외, 2016).

환경 오염 물질에 대한 우리의 노출 수준을 조절하기 위해서는 궁극적으로 미생물의 분해 능력과 한계를 인식하고 이해하며 이를 이용해 오염 물질 통제 및 완화 정책 개발을 하여야 한다. 협력적이고 일관성 있고 지속 가능한 (글로벌) 정책이 아래 사항들을 하기 위해 필요하다.

- 지역 및 전역 수준에서 생체 활성 물질의 종류 및 농도에 대한 식별, 평가 및 모니터링의 간소화
- 이러한 물질이 행성, 지역사회 및 개인의 건강에 미치는 영향에 대한 이해를 개선
- 환경에서 제거, 독성 영향 완화, 먹이사슬을 통한 유입 및 이동 감소를 위한 노력 조정, 그리고
- 이러한 오염 물질에 대한 우리의 노출 수준을 줄이기 위한 조치 개발

**변화를 위한 전지구적 연결성과 미생물 반응.** 마지막으로 앞에 이야기한 것들과 마찬가지로 매우 중요한 우리 행성의 두 가지 주요 특징들을 강조할 필요가 있다. 첫 번째는 연결성이다. 모든 행성 표면과 대기는 물, 바람, 그리고 인간 제품의 기계적인 공급 사슬에 의해 연결되는데, 이 사슬들은 표면과 대기에 있는 것의 대부분을 육지, 바다, 항공 운송 차량을 통해 때로는 수천 킬로미터까지 움직일 수 있다. 이러한 *물리적 연결*로 인해 널리 알려진 결과는 플라스틱 폐기물을 버려지는 현장에서 멀리 떨어진 해양의 모든 지역으로 운반되는 것과 유독성 폴리염화비페닐 (PCB)이 만들어지고 생산되고 사용되는 지역과 매우 먼 극지방의 동물에게서 발견되는 것이다. 따라서 비록 우리가 잠재적으로 위험한 화학 물질들과 이를 생산하는 시설들이 안전하게 관리될 수 있다고 믿더라도 이러한 화학물질의 연결성과 유통 메커니즘은 또 다른 문제를 야기할 수 있다. 그러나 생물학적인 요소들 또한 곤충, 새, 인간의 비행 혹은 수중 생명체의 경우 수영과 떠다니는 것과 같은 능동적인 이동 혹은 공기와 물을 떠다니는 씨앗, 꽃가루, 플랑크톤과 같이 수동적인 이동을 통해서 생물권의 연결과 이동에 기여한다. 2003 년 전 세계에 폭발적으로 확산된 중증급성호흡기증후군(SARS), 아시아에서 매년 발생하는 인플루엔자 전염병, 이집트로부터 수입된 유기농 호로파의 씨의 발아를 통해 독일에 전파된 장관 출혈성 대장균, 모로코와 같은 아프리카 나라들의 이민 증가로 인해 스페인으로 전염된 폐결핵 및 진드기 매개의 바이러스들이 *생물학적 연결*의 결과를 보여주는 예들이다. 국제 무역은 또한 병원균의 확산에 중요한 역할을 하며 이를 통해 농업, 공공 정원 및

환경에 막대한 경제적 영향을 미치는 세계에서 가장 심각한 식물 병원체 중 하나인 *자일라 패스트디오사* 균의 지리학적 확산에 전염에 책임이 있을 수도 있다. 대부분의 벡터 기반으로 전염되는 병원균의 경우에는 각 벡터마다 균주 특이성이 있기 때문에 제한된 숙주들만 감염시킬 수 있다. 하지만 이와 다르게 *자일라 패스트디오사* 균은 다양한 수액 공급 벡터에 의해 전염되어 광범위한 식물 숙주를 감염시킨다. 지구의 다양한 지점에서 채취되어 방류되는 선박의 물 밸러스트는 생물보안에 문제를 일으키는 비토착적이고 때로는 독성이 있는 미세조류와 같이 위험한 개체군을 새로 만들어 낼 수도 있다. 그리고 인광, 철분, 미생물이 풍부한 사막의 먼지들은 기류를 타고 먼 곳으로 운반된다. 이를 통해 사하라 사막의 먼지는 정기적으로 유럽에 떨어지기도 하며 멕시코 만과 사르가소 해역을 비옥하게 하여 녹조의 번식이 일어나게도 한다.

물과 공기의 연결성이 방사성 물질을 포함한 장수 화학 물질의 생물권 및 대기권 전체에 분배를 매개하듯이, 그것들은 매우 작고 거의 무게가 없는 미생물의 분포 또한 보장한다. 그러나 미생물들은 화학 물질과는 다르게 번식 및 콜로니를 형성할 수 있기 때문에 그들이 선호하는 어떠한 장소에도 영향을 줄 수 있다. 전세계적인 미생물의 분포는 다음과 같은 문장으로 요약될 수 있다: *모든 미생물은 어디에나 있다.* 필연적이며 아마 더 의미 있는 문장은 다음과 같다: *만약 미생물이 어딘가에 영향을 주어 이익을 얻을 수 있다면, 그들은 그곳에 있으면서 이 능력을 발휘할 것이다.*

지구의 두 번째로 중요한 특성은 자연적인 사건이나 인간의 우발적 또는 의도적인 행동에 의해 야기되는 변화가 종종 결과를 유발한다는 사실이며, 때로는 예상치 못한 결과를 불러일으켜서 예상과는 다른 결과를 초래한다는 사실이다. 이것은 물리-화학적 반응이나, 종종 생물학적, 특히 미생물학적 반응 때문일 수 있다. 따라서 어떤 종류의 조치를 취해야 한다고 결정할 때 실현가능성, 비용, 실행계획과 같은 일반적인 고려사항들 이외에도 미생물이 의도적이든 의도적이지 않던 큰 인위적인 변화에 대해서 수동적으로 대처하지 않는다는 사실을 고려해야 한다. 미생물들은 적극적으로 우리의 행동에 대해 적극적으로 대응하기 때문에 우리에게 행동에 대한 결과를 긍정적 혹은 부정적으로 변경할 수 있다.

우리는 항상 다음 질문을 제기할 필요가 있다: 미생물 활동이 논의 중인 과정에 직접 또는 간접적으로 관여하거나 영향을 받는가? 그리고 만약 그렇다면, 제안된 행동에 대한 그들의 반응은 무엇으로 예상되는가? 안타깝게도 우리는 아직 미생물과 토론을 할 수 없기 때문에 우리가 변화를 만들 때 그들이 무엇을 할 것인지 직접 물어볼 수 없다. 따라서 미생물들이 환경의 변화, 경고에 어떻게 반응하는지 관찰 및

모델링을 통한 증거 기반의 예측이 필수적이다. *세계적으로 생각하고 지역적으로 행동하라* 라는 유서 깊은 모토와는 다르게 우리는 사람들에게 *부수적인 결과를 초래할 수 있는 지역적 및 세계적 반응에 대한 가능성을 충분히 고려한 후에만 (고려 중이 주제와 완전히 다를 수 있는 직관적이지 않은 결과 포함) 지역적으로 행동할 것을 권고할 수 있다.*

*우리 행성의 상호 연결적인 본질은 우리가 행동하기 전에 아래 것들을 꼭 할 수 있어야 한다는 점을 필요하게 만든다.*

- *인접한 다양한 지역 혹은 세계적인 미생물들의 활동에 의해 본 행동이 가지는 객관적인 파급효과와 영향의 정도 그리고 관련 있는 시나리오의 속지*
- *장기적인 효과, 보호조치 및 적절한 수단을 포함한 시나리오의 지도 및 모델 구축*
- *보수적인 가정에 근거한 예측에 대한 신뢰가 부족할 때 대안을 신중하게 고려, 그리고*
- *정책을 모니터링, 검토 및 개선하며, 지역 단체에게 권한을 부여해 조정되지 않은 또는 악의적인 행동을 하는 것을 방지*

## 문제점

문제는 현재 미생물과 이들이 활동에 대한 지식은 미생물학자라는 작은 그룹의 전문가에게 집중되어 있다는 점이다. 물론 사회는 경제학자들이 정부의 새로운 정책의 시행비용에 대해 조언하는 것과 같이 항상 전문가들을 통하여 의사결정자들에게 조언을 해왔다. 여기서 문제는 미생물의 활동이 매우 광범위하고 직접적으로 그리고 친밀하게 사회의 모든 사람들의 일상적인 결정에 영향을 주지만 미생물학자들의 시기 적절한 상담이나 미생물 지식에 대한 질문은 (관련 정보들을 인터넷에서 얻을 수 있음에도 불구하고) 대부분의 상황에서 비실용적이거나 불가능하다는 것이다. 따라서 우리 사회는 정책 결정에 거의 관여를 하지 못하는 미생물학자들과 결정을 하는데 중요한 정보를 가지고 있지 않는 정책 입안자와 의사결정자들만 있는 셈이다. *만약 위기의 근본적인 원인이나 잠재적 해결책(예: Brüssow, 2017)이 정책 입안자와 이해당사자들에 의해 이해 및 평가될 수 없다면, 우리는 어떻게 효과적으로 당면한 위기를 해결할 수 있을까?*

위에서 설명한 것과 같은 재앙적 결과를 초래한 과거의 실수들을 반복하지 않으려면 문제에 대한 올바른 인식, 적절한 선택 및 증거 기반의 최적의 정책 결정을 뒷받침하는 필수적인 정보가 우리 개인 및 집단의 지식의 필수적인 요소가 되어야 한다. 미래에 일어날 수 있는 재앙적인 사건들을 촉발시키지 않기 위해서는

- 미생물학적 프로세스 및 활동과 그 다방향 상호작용 및 상호의존성에 대한 기본적인 지식은 대중의 인식의 일부가 되어야 한다. 그러나
- 이러한 프로세스에 대한 좀 더 전문적인 지식은 일부 정책 입안자들은 필수적으로 알고 있어야 한다. 그리고
- 의사 결정 시스템은 증거 기반 기준과 전문가의 검토를 더 충분히 요구하여야 한다.

## 해결책을 향한 길: 사회에서의 *미생물학적 지식* 함양

*미생물학의 핵심 요소는 기본 교육의 일부가 되어야 한다.* 교육자, 정치인, 산업 책임자, 국내 및 국제기구 책임자와 같은 일부 사회 구성원의 의사 결정이 다른 사회 구성원의 결정보다 사회적으로 더 큰 영향을 미치기 때문에 미생물학 지식은 특히 그들에게 가장 필요하다. 그럼에도 불구하고, 모든 개인은 일상적으로 미생물 관련 결정을 내리고 미생물 관련 일을 수행한다. 또한, 우리는 우리의 건강과 복지, 그리고 지구의 정책 결정에 관련된 모든 이해 관계자이다. 유권자나 이해 집단의 구성원 모두 의사 결정권자에게 유능한 시민의 권리를 행사하고 책임을 완수하기 위해서 우리는 *미생물학적 지식*을 갖추고 있어야 한다. 따라서 사회 수준에서의 미생물학적 문맹 해소가 결정적으로 요구된다. *미생물학적 지식*은 성인 직무 분석표의 일부가 되어야 한다.

유년기 교육 과정에서 습득한 기초 지식과 비판적 사고 능력은 일반적으로 성인기에 들어가는 데 필수적인 것으로 간주된다. 지금까지 모국어, 외국어, 역사, 지리, 시사, 수학, 물리, 화학 및 생물학 등의 지식은 균형된 교육의 필수 요소들로 간주되어왔다. 즉, 이러한 주제들은 성장 요소로 필수적이며, 개인 또는 직장 생활에서 요구되는 새로운 정보 처리 업무와 삶의 왜곡을 통해 우리를 안내하는 일상적인 결정을 생산적으로 내릴 수 있도록 도와준다. 1916년에 Bergey가 한 것처럼 우리는

미생물과 관련 활동에 대한 지식과 이해가 위 학문 분야들과 마찬가지로 일반 교육에 필수적이라고 주장한다.

*의사 결정자들이 적절하게 정보를 얻고 다른 모든 이해 관계자들이 사회와 관련 행동들이 어떻게 미생물 세계와 긴밀하게 상호 연관되어 있는지에 대한 기본적인 이해를 갖기 위해서는 미생물학을 학교 교과 과정의 핵심 요소로 지정해야 한다. 결과적으로, 사회적 이해 당사자들은*

- *자신과 다른 사람들 (예: 자손)에 대한 정보에 근거한 결정을 내릴 수 있는 권한을 갖게 될 것이다.*
- *의사 결정 대안에 대한 찬반 논쟁을 비판적으로 평가할 수 있는 권한을 부여함으로써 의사 결정을 내리는 의사 결정자에게 정보에 입각한 선호도를 제공하고*
- *과학적 증거를 토대로 의사 결정을 하지 못하는 사람들을 고려할 수 있는 권한을 부여 받게 된다.*

**용대 한 도전과 지속 가능한 발전 목표에 중점을 둔 모든 연령대를 위한 개인 경험 중심의 교육 개념 및 형식.** 미생물은 첫날부터 우리의 삶에 영향을 미치기 때문에 (실제로 미생물은 훨씬 더 일찍 우리에게 영향을 미침), 교육은 초등 교육을 시작할 때 시작하여 모든 교육 수준에서 공통된 실마리가 되어 모든 수준의 의사 결정권자가 최선의 정보에 입각한 의사 결정을 내릴 수 있도록 해야 하며 이러한 결정의 근거를 이해할 수 있도록 젊은이들에게 지식을 제공해야 한다. 사람들은 확실한 것, 가능성 있는 것과 알 수 없는 것의 차이를 이해해야 한다. 각각의 개인은 근거를 기반으로 어느 정도 위험을 감수하며 근본적으로 유익한 조치를 내릴 수 있는 위험편익분석 또는 자신을 대신하여 그러한 결정을 내리는 기관과 건설적으로 상호 작용할 수 있어야 한다. 그리고 미래에 최선의 근거 기반 정책을 만들기 위해 어떤 새로운 지식을 획득해야 하는지를 알아야 한다.

우리는 3 차 교육 (see also e.g. Bergey, 1916; Savage and Bude, 2014; Scalas et al, 2017; <https://enviroliteracy.org/environment-society/environmental-health/microorganisms/>; <http://www.actionbioscience.org/biodiversity/wassenaar.html>, <https://schaechter.asmblog.org/schaechter/2013/04/whose-planet-is-it-anyway-1.html>) 과정의 교사 교육을 위한 미생물학 교육 커리큘럼 외에도 유치원, 초등학교, 중학교 및 고등학교를 위해 개발 된 미생물학 커리큘럼을 구상한다. 미생물학 교육

커리큘럼은 공공 교육 서비스 뿐만 아니라, 미생물학 교육을 받은 개인의 새로운 미생물학 정보 업데이트해주고, 학교 수업을 받지 못한 사람들이 기초를 배우고 새로운 정보도 터득할 수 있도록 해야 한다. 이러한 커리큘럼의 개발은 해당 교육 기관의 임무가 될 것이며, 구현을 용이하게 하기 위해 우리는 일련의 주제 – *미생물학적 지식 프레임 워크*<sup>3</sup>-와 일상적인 경험에 관한 간단한 초기 질문을 포함한 교육 형식을 제안하고, 이어서 단순한 언어, 웅장한 도전 과제와 SDGs의 관련성, 생물 지층 과정과 행성 건강의 관계, 그리고 특히 의사 결정에 대한 결과들을 이용해 기본 미생물학을 접하게 하려고 한다.

예시.

- 아버지: 오늘 오후에 볼링장에서 햄버거를 먹고 싶지만, 제니는 소가 지구 온난화에 기여한다고 어제 말했다: 사실인가? (*온실 가스, 배출원 및 흡수원, 반추위 소화, 메탄 배출량, 지구 온난화, 해수면 상승 및 기상 이변, SDG-13: 기후 변화 방지*);
- 어머니: 우리는 조앤에게 홍역이 있다고 학생들에게 들었다. 왜 조앤은 나처럼 예방 접종을 받지 않았지? (*백신 유효성, 상관관계 및 인과 관계, 위험편익분석, 집단면역, 예방接种의 부수적인 이점, SDG-3: 건강한 삶의 보장*);
- 어머니: 너는 언제나 똥이 더럽기 때문에 화장실에 가면 항상 손을 씻으라고 하는데 똥이 버려지면 어떻게 되니? (*배설물 처리, 배설물 병원체, 배설물 병원균 부하 및 수질의 변종 지표, SDG-6: 모든 사람의 위생*);
- 아가씨: 어둠 속에서 식물이 자라지 못하는 이유는 무엇입니까? (*식물과 광합성 미생물은 태양 에너지를 포착하고 바이오 매스를 만든다: 먹이 그물의 기본; 광합성, 엽록체, 초기 미생물 유래 미토콘드리아; 식물 및 광합성 미생물은 세계에 음식을 제공한다, 무공해, 지속 가능한 개발, SDGs 2: 굶주림 종료, 7: 지속 가능한 에너지에 대한 접근성 확보, 12: 지속 가능한 생산 패턴 보장*)

이러한 접근법은 사회에 대한 미생물학의 관련성/중요성이 첫 수업의 시작부터 학생들에게 명백해지는 장점이 있다.

---

<sup>3</sup> *학교와 유치원에서의 미생물 교육: 아동 경험 중심적 틀*, Timmis, K. N. 외, 준비 중

선택한 주제의 수집 목표는 다음과 같다.

- 다양한 사회 및 문화 환경에서 다양한 연령층을 대상으로 적절한 커리큘럼을 개발할 수 있도록 지원한다.
- 미생물 생태 생리학 활동에 의해 영향을 받거나 지지하는 주요 행성의-생물권-인간 과정들과 문제들을 밝힌다.
- 이러한 활동이 인간과 생물권의 다른 구성원의 웰빙에 어떻게 영향을 미치는지 찾는다.
- 미생물 활동이 인간의 행동과 그 결과에 어떻게 영향을 받는지 찾는다.
- 개인적, 인간적, 행성의 이익을 위해 미생물 활동을 어떻게 조종하거나 활용할 수 있는지, 그리고 SDG 달성에 기여할 수 있는 방법을 찾는다.
- 더 넓은 세상에서 인간과 지구촌 생물권과의 미생물학적 관계에 대한 전망을 제공한다.

초기의 *미생물학적 지식* 프레임 워크는 인간 복지, 지구, 수자원, 식물, 동물, 영양-식품-음료 및 생명 공학 분야의 범주로 그룹화 된 100 가지 정도의 경험 중심 주제로 구성되며 곧 온라인으로 무료 제공될 것이다.

미생물을 토론만으로 시각화하기 어렵지만 미생물학은 실습 실험 주제이기 때문에 미생물학 관련 교육은 특히 학생들에게 매력적일 수 있고 다양한 교육과정에 맞춘 흥미로운 실험들이 아이들에게 제공될 수 있다. 해당 주제 카테고리와 연관된 간단한 실험들도 온라인에 제안될 것이다. 또한 상업적 기업 (양조, 치즈 제조, 빵 생산, 발효 등)과 공공 기관 (폐기물 처리 공장, 진단 실험실 등)이 수행하는 많은 흥미로운 미생물 공정들을 학교 견학을 통해 제공될 수 있다. 학생들이 이러한 경험을 통해 최대한의 지식 습득, 흥미 및 즐거움을 갖도록 조직에서 제안한 잠재적 견학 목록과 이를 계획하는 방법이 온라인에 제공될 것이다.

지식 프레임워크에서 제공되는 주제는 범위가 한정되어 있지 않으며 특정 연령대를 상대로 다루지는 방식으로 구조화되어 있지도 않다. 일부 입문 주제를 제외하고는 대부분이 독립적으로 이해할 수 있기 때문에 교사의 선택, 학생 학습 스타일 및 목표에 따라 선택 및 맞춤 옵션의 모듈 식 시스템을 구성한다. 그럼에도 불구하고, 가장 중요한 목표는 아이들이 학교 생활 동안 모든 주제에 익숙해지는 것이다.

미생물학적 원칙을 가르치고 미생물학 전문가를 양성함으로써 *미생물학적* 지식 함양 자를 창출하려는 의도는 아니라는 점을 분명히 해야 한다. 오히려 일상적인 생활을 개선하거나 근거 있는 정책의 개발 및 행정 관리를 위해 사회에 권한을 부여하는데 중심이 되는 미생물학적 활동에 대한 적절한 지식을 제공하는데 목적을 두고 있다.

그리고 미생물이 우리의 적이라는 널리 퍼져 있는 편견이 부정확할 뿐만 아니라 위험한 행위라는 것을 사회가 빨리 인식해야 한다. 미생물은 인간과 비슷하다: 대부분은 우리 삶에 직접적인 영향을 미치지 않으며, 대부분 매우 유익하며, 소수만이 우리에게 위험하다. 그리고 인간과 마찬가지로 질병이나 물질 분해를 일으키는 미생물들이 대부분 언론에 보도되며 우리가 가장 잘 알고 있는 나쁜 생명체이다. 그럼에도 불구하고 미생물은 우리의 삶에 조용히 도움을 제공하며 식량 증가와 같은 주요 문제를 해결하기 위해 부름을 받을 수 있으며 미생물의 50%가 우리 몸에 존재하는 세포들과 가까운 가족으로 표현되기 때문에 미생물 전체가 우리의 친구로 묘사되는 것이 중요하다.

*유해한 신념과 미생물 공포증을 없애기 위해서는 사회의 미생물에 대한 지식이 요구된다. 이것은 미생물학 지식 지원의 핵심 메시지 중 하나이며 학교 교과 과정 최전선에 서게 될 것이다.*

## 이것을 해보자!

*거대 생물*-동물 및 식물-은 생물권의 주요 구성원일 뿐만 아니라 인간 사회, 진화, 문명 및 인간 정신의 필수 구성 요소이기도 하다. 길들여진 종으로, 그들은 음식, 섬유, 편안함, 쾌락 및 복지를 제공하고, 야생 종으로써 궁금증, 취미 및 다양성의 원천을 제공한다. *거대 생물*의 보전은 우리의 원초적인 책임이다. 결과적으로, 생물학-근본적으로 동물 및 식물 생물학-은 역사적으로 인간 생물학 및 번식 교육을 위한 기초로서 자체 교육의 핵심 주제이다. *거대 생물*에 대한 대중의 관심과 인식은 David Attenborough 가 발표 한 블록버스터 TV 다큐멘터리의 영향으로 최근 몇 년 동안 엄청나게 증가했다

(<https://www.theatlantic.com/science/archive/2016/05/every-episode-of-david-attenboroughs-life-series-ranked/480678/>). 그 반면에, 미생물은 작은 크기 때문에 에이즈, 에볼라 및 적조와 같은 뉴스거리가 되는 경우를 제외하고 대부분 일반 대중의 눈에 띄지 않는다 -눈에 보이지

않으면 마음도 멀어진다-생물권에서 보이지 않는 구성 요소는 일반 교육에서 주로 무시된다. 그럼에도 불구하고 최근 놀라운 미생물군집 발견과 이들의 인간 생물학 및 행동에 대한 영향으로 미생물에 대한 대중들의 관심이 높아졌다. 하지만, 여전히 미생물은 본질적으로 추상적인 개체로 인식되고 있으며, 인터넷보다 이해하기 어려우며, 기억이 작동하는 방식과 유사하다. 그러나 미생물의 중요성은 측정할 수 없을 정도로 인터넷을 훨씬 능가한다. 우리는 인터넷이 발명되기전까지 살아남았으나 미생물의 생명 지원 시스템 없이는 생존할 수 없었고 앞으로도 생존할 수 없을 것이다. 따라서 놀랍고 내재적이지만 미시적인 아름다움을 지닌 미생물 세계가 추상적 인식에서 회화적 인식으로 옮겨가고 인간 정신에서 정당한 위치를 차지하는 것이 필수적이다. 시각 보조 장치는 여러 수업들의 중추 역할이 될 것이고 미생물 예술의 폭발적인 영역은 상상력을 자극할 것이다 (예: <https://www.bbc.com/news/uk-england-oxfordshire-45099420>). 미생물에 대해 논의할 때 일상적으로 우리 아이들이 즉시 머릿속으로 미생물을 시각화할 수 있게 되어야 한다. 미생물이 추상적인 형태에서 이동하여 형태를 취함에 따라 미생물이 아이들에게 현실화될 것이고 아이들에게 인기가 제일 많은 미생물이 생길 것이다! 꼭 껴안고 싶은 곰 인형과 털 많은 양장난감처럼 인간 중심으로 캐릭터화 된 증기 메탄오, 약삭빠른 울보, 가시로 뒤덮인 규조류는 유행에 민감한 장난감 제조업체들에게 제작될 것이다. 이런 캐릭터들은 그리 멀지 않은 미래에 우리에게 사랑받는 TV 만화 캐릭터가 될 수도 있다.

그림. 1 에는 이 논설의 세가지 근본적인 목표가 나타나 있으며 이는 학교 교육 과정에 미생물학 지식 함양 주제들을 도입하는 로드맵이기도 하다.

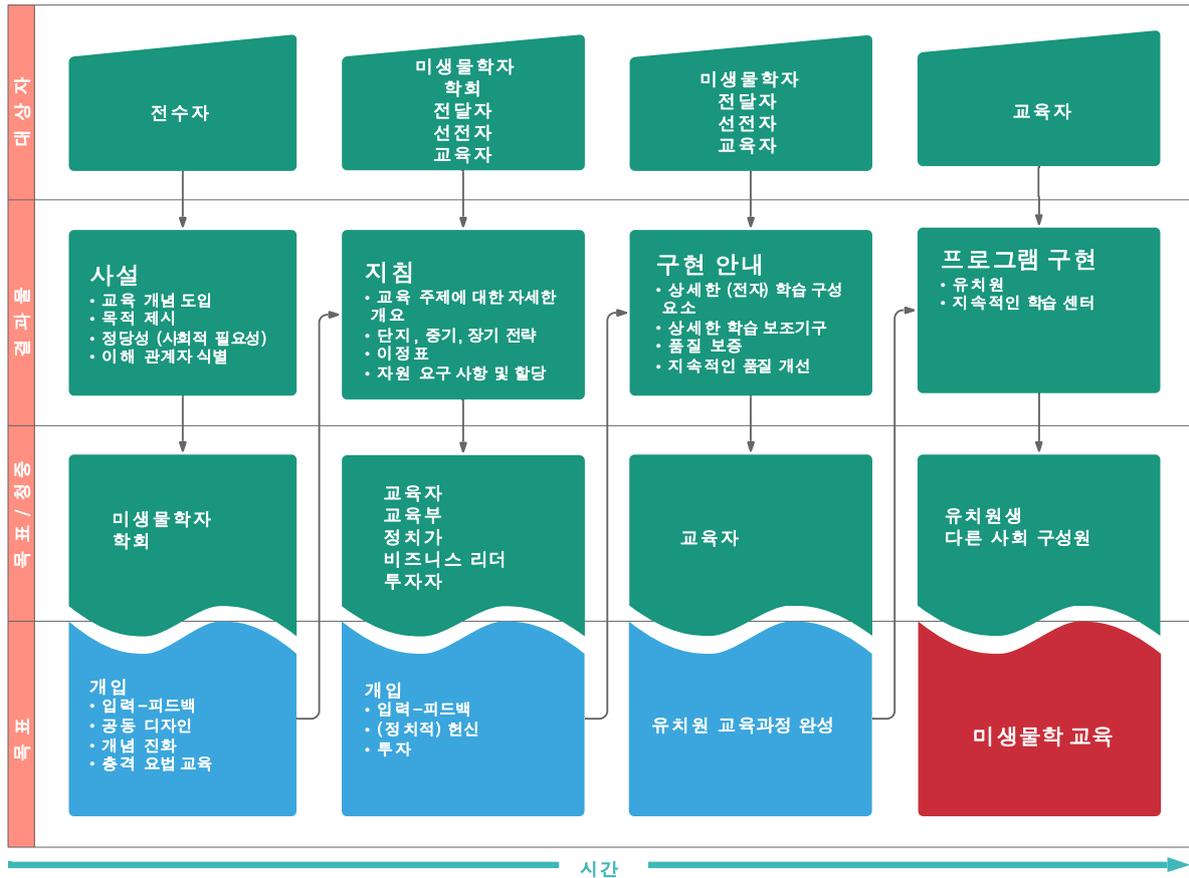


그림. 1 미생물학적 지식 함양 계획.

\* 학교와 유치원에서의 미생물 교육: 아동 경험 중심적 틀, Timmis, K. N. 외, 준비 중

첫 번째는 다양한 개인 및 사회 문제에 대한 적절한 증거 기반 결정에 도달하고 그 사례를 *미생물학적 지식*이 함양된 사회에 보여줌으로써 기본 교육에서 중요한 미생물학 주제들을 포함시켜 제시하기 위해 요구되는 사회의 중요한 지식과 역량적 결함에 노출시키는 것이다.

두 번째는 미생물 학자, 미생물학적 학습이 잘 된 사회 및 미생물학에 능통한 전문가들에게 미생물학의 기본 틀을 더욱 진화시키고 수업 관련 주제, 비디오 및 실험을 위한 아이디어와 자료를 제공하며, 교육 도구 개발에 필요한 자금 조달법을 찾는 계획에 참여하는 것이다.

이 논설의 가장 중요한 세 번째 목표는 교육자, 정치인, 비즈니스 리더 및 기타 조력자들에게 미생물학 교육의 중요성이 전달되도록 국제적인 노력을 촉진하고 제안의 본질을 설득해 미생물학 교육이 실제로 실행되도록 하는 것이다 (*우리는 모두 행성 및 인간 건강의 이해 당사자들이다: 당신은 현재의 여러 위기를 해결할 수 있는 우리 능력의 근본을 무시할 수 있는가?*). 우리는 이 논설이 여러 독자들이 쉽게 이해할 수 있도록 최대한 일상 언어를 사용하고 전문 용어를 피했다.

## 감사의 글

본 논설은 우리 사회의 미생물학 글쓰기 능력을 향상시킬 근본적인 필요성을 인식한 미생물 학자들의 초기 노력을 바탕으로 한다. 이들은 미생물학 문해력의 문제점을 인식하고 해결하기 위해 교과 과정에 통합될 수 있는 탁월한 아동 중심 텍스트 및 다양한 교재를 창작함으로써 훌륭한 기초를 마련하였다.

## 참고 자료

- Bach, J.-F. (2018) The hygiene hypothesis in autoimmunity: the role of pathogens and commensals. *Nat Rev Immunol* 18: 105-120
- Bartlett, J.G. (1979) Antibiotic-associated pseudomembranous colitis. *Rev Infect Dis* 1: 530-539.
- Bergey, D.H. (1916) The pedagogics of bacteriology. *J Bacteriol* 1: 5-14
- Brown, J.M., and Hazen, S.L. (2015) The gut microbial endocrine organ: bacterially derived signals driving cardiometabolic diseases. *Annu Rev Med* 66: 343-359
- Brüssow, H. (2017) Infection therapy: the problem of drug resistance - and possible solutions. *Micro Biotech* 10: 1041-1046.
- Cabello, F.C. (2006) Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: a growing problem for human and animal health and for the environment. *Environm Microbiol* 8: 1137-1144.
- Caselli, E. (2017) Hygiene: microbial strategies to reduce pathogens and drug resistance in clinical settings. *Micro Biotech* 10: 1979-1983.
- Christen, V., Kunz, P.Y. and Fent, K (2018) Endocrine disruption and chronic effects of plant protection products in bees: Can we better protect our pollinators? *Environ Pollut* 243: 1588-1601.
- Curtis, T. (2006) Microbial ecologists : it's time to 'go large'. *Nat Rev Microbiol* 4 : 488
- Du Toit, A. (2019) The gut microbiome and mental health. *Nat Rev Microbiol* <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0163-z>
- Falkow, S., Marmur, J., Carey, W.F. et al. (1961) Episomic transfer between *Salmonella typhosa* and *Serratia marcescens*. *Genetics* 46:703-706
- Falkow, S. (1970) Antibiotics in animal feeds. *N Engl J Med* 282: 693-4.
- Falkow, S. (1975) *Infectious Multiple Drug Resistance* (Pion Ltd, London)
- Finlay, B.B. and Arrieta, M.-C. (2016) *Let them eat dirt*. Greystone Books
- Garcia, J.L, de Vicente, M. and Galan, B. (2017) Microalgae, old sustainable food and fashion nutraceuticals. *Micro Biotech* 10: 1017-1024.
- Gilbert, J.A. and Yee, A.L. (2016) Is triclosan harming your microbiome? *Science* 353: 348-34
- Gilbert, J.A., Knight, R. and Blakeslee, S. (2017) *Dirt is Good*. St Martin's Press
- Godfray, H.C., Blacquière, T., Field, L.M. et al (2015) A restatement of recent advances in the natural science evidence base concerning neonicotinoid insecticides and insect pollinators. *Proc Biol Sci* 282: 20151821
- Gomez de Agüero, M., Ganal-Vonarburg, S.C., Fuhrer, T., et al. (2016) The maternal microbiota drives early postnatal innate immune development. *Science* 351: 1296-302
- Hobbie, S.E., Finlay, J.C., Janke, B.D. et al (2017) Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implication for managing urban water pollution. *Proc Natl Acad Sci USA* 114: 4177-4182

- Lane, S., Noni E. MacDonald, N. E., Marti, M. and Dumolard, L. (2018) Vaccine hesitancy around the globe: Analysis of three years of WHO/UNICEF Joint Reporting Form data-2015–2017. *Vaccine* **36**: 3861–3867.
- Lee, S.Y., Kim, H.U., Chae, T.U. et al (2019) A comprehensive metabolic map for production of bio-based chemicals. *Nature Catalysis* **2**: 18-33
- Levy, S. B., FitzGerald, G. B. and Maccone, A. B. 1976. Spread of antibiotic-resistant plasmids from chicken to chicken and from chicken to man. *Nature* **260**: 40–42
- Levy, S. B. 1982. Microbial resistance to antibiotics. An evolving and persistent problem. *Lancet* **8289**: 83–88
- de Lorenzo, V. (2017) Seven microbial bio-processes to help the planet. *Micro Biotech* **10**: 995-998.
- de Lorenzo, V., Marliere, P. and Sole, R. (2016) Bioremediation at a global scale: from the test tube to planet Earth. *Micro Biotech.* **9**: 618-625
- Microbial Biotechnology (2017) The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. *Micro Biotech* **10**: 979-1274
- Milani, C., Duranti, S., Bottacini, S. et al. (2017) The first microbial colonizers of the human gut: composition, activities, and health implications of the infant gut microbiota. *Microbiol Mol Biol Revs* **81**: e00036-17
- Monneret, C. (2017) What is an endocrine disruptor? *Comptes Rend Biol* **340**: 403-405
- Moossavi, S., Miliku, K., Sepehri, S., Khafipour, E. and Azad, M.B. (2018) The prebiotic and probiotic properties of human milk: implications for infant immune development and pediatric asthma. *Front Pediatr* **6**: 197. doi: 10.3389/fped.2018.00197
- Motta, E.V.S., Raymann, K. and Moran, N.A. (2018) Glyphosate perturbs the gut microbiota of honey bees. *Proc Natl Acad Sci USA* **115**: 10305-10310
- Nakatsuji, T., Chen, T.H., Butcher, A.M. et al (2018) A commensal strain of *Staphylococcus epidermidis* protects against skin neoplasia. *Sci Adv* **4**: eaao4502
- Nielsen, P.H. (2017) Microbial biotechnology and circular economy in wastewater treatment. *Micro Biotech* **10**: 1102-1105.
- Richards, S., Paterson, E., Withers, P.J.A. and Stutter, M. (2015) The contribution of household chemicals to environmental discharges via effluents: combining chemical and behavioural data. *J Environ Manage* **150**: 427-434
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*. **461**:472-475
- Rossen, N.G., MacDonald, J.K., de Vries, E.M., D'Haens, G.R., de Vos, W.M., Zoetendal, E.G., and Ponsioen, C.Y. (2015) Fecal microbiota transplantation as novel therapy in gastroenterology: a systematic review. *World J Gastroenterol* **21**: 5359–5371.
- Savage, A. F. and Jude, B. A. (2014) Starting small: using microbiology to foster scientific literacy. *Trends Microbiol* **22**: 365-367
- Scalas, D., Roana, J., Mandras, N. et al (2017) The Microbiological@mind project: a public engagement initiative of Turin University bringing microbiology and health education into primary schools. *Int J Antimicrob Agents* **50**: 588-592
- Sender, R., Fuchs, S., and Milo, R. (2016) Are We Really Vastly Outnumbered? Revisiting the Ratio of Bacterial to Host Cells in Humans. *Cell* **164**: 337–340
- Sharma, A. and Gilbert, J. A. (2018) Microbial exposure and human health. *Curr Opin Microbiol.* **44**: 79-87.
- Timmis, K.N., de Lorenzo, V, Verstraete, W. et al (2017) The contribution of microbial biotechnology to economic growth and employment creation. *Micro Biotech* **10**: 1137-1144.

- Timmis, K.N., de Vos, W.M., Ramos, J.L., et al (2017) The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. *Micro Biotech* **10**: 984-987
- Trinh, P., Zaneveld, J. R., Safranek, S. and Rabinowitz, P. M. (2018) One Health relationships between human, animal, and environmental microbiomes: a mini-review. *Front Public Health*. **30**: 6: 235, doi: 10.3389/fpubh.2018.00235
- Trivedi, P., Schenk, P.M, Wallenstein, M.D and Singh, B.K. (2017) Tiny microbes, big yields: enhancing food crop production with biological solutions. *Micro Biotech* **10**: 999-1003.
- Verstraete, W. and de Vrieze, J. (2017) Microbial biotechnology with major potentials for the urgent environmental needs of the next decades. *Micro Biotech* **10**: 988-994.
- Wampach, A., Heintz-Buschart, J., Fritz, V., Ramiro-Garcia, J., Habier, J., et al (2018) Birth mode is associated with earliest strain-conferred gut microbiome functions and immunostimulatory potential. *Nature Com* **9**: 5091.
- Wang, B., Yao, M., Lv, L., Ling, Z. and Li, L. (2017) The human microbiota in health and disease. *Engineering* **3**: 71-82
- Watanabe, T. (1963) Infective heredity of multiple drug resistance in bacteria. *Bacteriol Rev* **27**:87-115
- Watanabe, T. (1966) Infectious drug resistance in enteric bacteria. *N Engl J Med* **275**: 888-894.
- Whipps, J.M., Lewis, K. and Cooke, R.C. (1988) Mycoparasitism and plant disease control 161-187. In: Burge, NM (editor), *Fungi in Biological Control Systems*. Manchester University Press; p176.
- zur Hausen, H., Bund, T. and de Villiers, E. M. (2017) Infectious agents in bovine red meat and milk and their potential role in cancer and other chronic diseases. *Curr Top Microbiol Immunol* **407**: 83-116