

미생물을 이용한 화학물질 생산 연구동향



한양대학교 김동립 교수

1. 개요

최근 환경오염의 주체이면서 점점 고갈되어가는 화석연료를 대체 할 수 있는 대체 에너지, 친환경 에너지원에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있고 사회적 관심도 집중되어 있다. 그 가운데 화석연료의 대안으로서 MFC(Microbial Fuel Cell), MES(Microbial Electrosynthesis)와 같은 미생물을 이용한 전기 또는 화학물질 생산에 대한 연구가 주목받고 있다. 특히 2010년 미국 Massachusetts 대학의 Lovley 교수 연구팀이 진행한 연구에서 미생물 전기생합성(Microbial Electrosynthesis)라는 용어를 ‘미생물을 이용하여 전극에서 전자를 공급받아 이산화탄소를 탄소화합물로 전환하는 것’으로 정의하고부터 미생물 전기생합성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

미생물 전기생합성 시스템은 일반적으로 고부가가치 화학물질을 합성하는 미생물, 미생물에 전자를 공급하는 지지체, 그리고 미생물이 화학물질을 합성할 수 있게끔 조성된 환경으로 구성되어 있고, 이를 이용해 친환경적으로 고부가가치 화합물을 생산하는 것을 목표로 한다. 따라서 고부가가치 화합물을 효율적으로 생산하기 위해서는 이에 최적화된 미생물 개발, 미생물이 부착되는 지지체 향상 등 다방면에서 연구가 진행되어야 한다.

2. 구조체 향상을 통한 미생물 전기생합성 향상

미생물 전기생합성에 있어 지지체 구조에 따라 지지체에 부착되는 미생물의 수가 달라지고 지지체의 전기전도도에 따라 미생물에 공급되는 전하량이

달라져 화합물의 생산량, 미생물의 생존성에 중요한 영향을 미친다. 따라서 최근의 연구들은 삼차원 전극의 비표면적 향상을 통한 미생물 부착밀도 향상, 전극의 전도성 향상을 통한 미생물로의 전자 공급 증대에 초점을 맞추고 있다.

2014년 싱가포르 Nanyang 대학, 중국 과학기술대학, 중국 Jiangsu 대학 공동 연구팀은 그래핀(Graphene)이 포함된 용액과 박테리아(*Shewanella oneidensis* MR-1)를 섞으면 그래핀에 박테리아가 부착이 되고 이것이 전극 표면에 자가 배열(self-assembly)하여 biofilm을 형성한다는 것을 발견하였다. 이렇게 제작된 biofilm은 기존 카본 전극과 대비하여 약 74배 전류밀도가 향상된 결과를 보였다. 이렇게 향상된 전류밀도는 미생물에 그래핀을 섞음으로써 미생물 부착밀도가 향상되고, 이에 따른 전기화학반응이 증가한 것에 기인한다고 분석하였다.

2014년 오스트레일리아 Queensland 대학의 Flexer 교수 연구팀은 기존 RVC(Reticulated Vitreous Carbon) 탄소전극에 탄소나노튜브(Carbon nanotube)를 직접 성장시켜 계층구조를 갖는 bio cathode를 제작하였다. 그리고 제작된 bio cathode 위에 여러 미생물이 혼재된 biofilm형성한 후 기존 graphite 전극에 형성된 biofilm과 acetate 생산량을 비교해 보았다. 그 결과 acetate의 생산량을 각각 전극의 비표면적으로 나눠 봤음에도 불구하고 계층구조를 갖는 bio cathode는 graphite 전극에 비해 2.6배 향상된 생산량을 보였다. 그 원인으로 탄소나노튜브를 RVC위에 성장시킴으로써 미생물-구조체 간의 부착향상, 세포의 전자 전달(extracellular electron transfer)이 향상되었기 때문으로 발표하였다.

비표면적, 전도성 향상을 통한 미생물 전기생합성 효율 향상 연구 외에도 미생물을 나노 구조물 상에 원하는 방향으로 배열하기 위한 연구도 진행된 바 있다. 이는 미생물 부착 배열 방향을 조절함으로써 단위 면적당 부착 가능한 미생물 양을 향상시키기 위함이다.

2014년 미국 California 대학교의 Yang 교수 연구팀은 실리콘 나노선(Si Nanowire)에 미생물을 부착할 때 미생물 용액 내 염화나트륨(NaCl) 농도에 따라서 미생물의 부착방향이 변화한다는 것을 발견하였다. 일반적으로 염화나트륨을 첨가하지 않고 박테리아(*Sporomusa ovata*)를 실리콘 나노선에 부착할 경우에는 나노선과 수직인 방향으로 부착되려고 하는 경향이 있다. 하지만 염화나트륨 농도를 증가시킬수록 나노선과 수평한 방향으로 미생물 부

작방향이 변경되는 것을 발견하였다. 이는 미생물의 배열 방향을 조절함으로써 단위 부피 당 미생물 부착량을 증가시키고 최종적으로 전기 생합성 효율을 향상시킬 것으로 판단된다.

3. 전기생합성용 미생물 Engineering 연구

앞서 언급된 미생물 지지체 향상 연구 외 중요한 요소인 화학물질을 생산하는 미생물의 Engineering을 통한 전기생합성 향상에 대한 연구도 활발히 진행되어왔다. 최근의 연구 동향은 여러 고부가가치 화합물을 생산하는 기본 단위로 볼 수 있는 Acetate에서 나아가 이를 이용하여 고부가가치 화합물을 생산할 수 있는 미생물을 개발하는 것에 집중되어 있다. 다른 한편으로는 미생물 전기생합성의 근본적인 메커니즘에 대한 연구도 수행되고 있다.

2014년 미국 Massachusetts 대학 연구팀은 Clostridium ljungdahlii 박테리아를 Tuning하여 고부가가치 화합물의 일종인 butyrate를 생산하는데 성공하였다. 일반적인 Clostridium ljungdahlii 박테리아는 butyrate의 생산하는 능력이 없는데 그들은 Clostridium ljungdahlii의 유전자를 조정하여 대사경로를 변경시켜 butyrate를 생산할 수 있도록 Engineering하였다.

2015년 미국 Stanford 대학 연구팀은 미생물 전기생합성에서 미생물이 전자를 포집하는 메커니즘에 대하여 분석하였다. 그들은 Methane을 생산하는 Methanococcus maripaludis 박테리아를 Tuning하여 미생물 내에서 수소 및 포름산을 생산하는 효소를 만들지 못하게 하였다. 그 결과 수소와 포름산 생산량이 감소함과 더불어 Methane생산량 또한 감소하는 것을 확인하였고 이를 통해 수소나 포름산이 미생물에 전자를 제공하는 중간 매개체라는 사실을 확인하였다.

4. 미생물 전기생합성을 위한 환경 조성

미생물 전기생합성을 위한 미생물, 지지체의 성능 뿐 아니라 반응 환경을 최적화하여 전기생합성 효율을 향상시키는 연구도 병행되고 있다.

2013년 미국 California 대학의 연구팀은 미생물 전기생합성 환경을 조성할 때 양극에는 sporomusa ovata, 음극에는 Desulfobulbus군의 박테리아를 부착시켜 음극에서 Sulfide가 산화되어 생성되는 전자를 이용하여 양극에서

Acetate 생산량을 최적화하는 연구를 진행하였다. 이 연구에서 양극에만 *s. ovata* 박테리아를 부착시켰을 경우에는 음극의 Surfide의 산화가 완전히 일어나지 않아 Acetate생산량이 $24.8\text{mmol/day}\cdot\text{m}^2$ 의 수준이 유지되었다. 반면에 음극에 *Desulfohalobium*군의 박테리아를 부착하였을 때 surfide의 산화가 완전히 이뤄지면서(surfide $\rightarrow$ sulfur $\rightarrow$ sulfate) 전자 공급이 증가하여 Acetate 생산량이 $49.9\text{mmol/day}\cdot\text{m}^2$ 까지 두 배 가량 증가하는 것을 확인하였다.

2015년 미국 Pennsylvania 주립 대학에서는 여러 미생물이 혼재되어있는 반응 환경에서 특정 미생물의 성장을 억제하여 원하는 화합물만 생산할 수 있는 연구를 보고하였다. 일반적으로 여러 미생물이 혼재되어 있는 반응 환경에서는 열역학적 안정성으로 인해 전기생합성 시 methane이 주로 생산되는데(methanogenesis) 이들은 Alamethicin 펩티드 항생물질을 투입하여 methanogenesis를 억제하고 Acetate 생산을 촉진시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

2015년 미국 California 대학의 연구팀은 미생물 System을 최적화하여 다양한 고부가가치 화합물질을 생산할 수 있는 미생물 전기생합성 시스템을 고안하였다. 이 미생물 전기생합성 시스템은 상단에 산화티타늄 나노선(TiO_2 Nanowire), 하단에 혐기성(anaerobic) 박테리아(*s. ovata*)가 부착된 실리콘 나노선(Si Nanowire)으로 구성된다. 실리콘 나노선은 태양광 조사를 통해 전자를 생성하여 *s. ovata*에 제공하고, *s. ovata*는 전달받은 전자와 반응 환경 내의 이산화탄소를 이용하여 Acetate를 생산하게 된다. 그들은 여기서 더 나아가 Engineered 된 박테리아(*E. Coli*)를 이용하여 Acetate를 *n*-butanol, amorphadiene, PHB biopolymer 등 다양한 화합물로 변환하였다. 이때 Acetate에서 화합물로의 전환률은 *n*-butanol은 26%, amorphadiene은 25%, 생분해성 친환경 플라스틱의 일종인 PHB 폴리머는 52%에 해당된다. 이들은 이 시스템에서 이산화탄소로부터 Acetate로의 전환률이 약 0.38%정도 되는 것으로 분석하였고, 이는 자연환경에서의 식물 광합성 효율과 비슷한 수치로 평가하였다.

5. 고찰

미생물 전기생합성은 화석연료 대체, 친환경 에너지 개발이라는 궁극적 목표아래 활발히 연구되어 왔다. 그러나 현재까지 보고된 성능은 상용화되기에

는 많이 부족한 실정이다. 상용화를 목표로 하기 위해서는 이를 위한 미생물 engineering 뿐만 아니라 지지체 및 반응 환경 등이 골고루 개발되고 최적화 되어야 할 것으로 판단된다. 최근의 연구들은 나노기술의 비약적인 발전과 함께 이를 미생물 전기생합성 시스템에 접목하여 괄목할만한 성과를 내고 있다. 이런 추세라면 화석 연료를 대체할 날도 멀지 않았을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. K. P. Nevin, T. L. Woodard, A. E. Franks, Z. M. Summers, D. R. Lovley, "Microbial Electrosynthesis: Feeding Microbes Electricity To Convert Carbon Dioxide and Water to Multicarbon Extracellular Organic Compounds", *mBio*, 1, (2010) 00103–10.
2. Y. C. Yong, Y. Y. Yu, X. Zhang, H. Song, "Highly Active Bidirectional Electron Transfer by a Self-Assembled Electroactive Reduced-Graphene-Oxide-Hybridized Biofilm", *Angewandte Chemie International Edition*, 53 (2014) 4480–4483.
3. L. Jourdin, S. Freguia, B. C. Donose, J. Chen, G. G. Wallace, J. Keller, V. Flexer, "A novel carbon nanotube modified scaffold as an efficient biocathode material for improved microbial electrosynthesis", *Journal of Materials Chemistry A*, 2 (2014) 13093–13102.
4. K. K. Sakimoto, C. Liu, J. W. Lim, P. Yang, "Salt-Induced Self-Assembly of Bacteria on Nanowire Arrays", *Nano Letters*, 14 (2014) 5471–5476.
5. T. Ueki, K. P. Nevin, T. L. Woodard, D. R. Lovley, "Converting Carbon Dioxide to Butyrate with an Engineered Strain of *Clostridium ljungdahlii*", *mBio*, 5 (2014) 01636–14.
6. J. S. Deutzmann, M. Sahin, A. M. Spormann, "Extracellular Enzymes Facilitate Electron Uptake in Biocorrosion and Bioelectrosynthesis", *mBio*, 6 (2015) 00496–15.
7. Y. Gong, A. Ebrahim, A. M. Feist, M. Embree, T. Zhang, D. R. Lovley, K. Zengler, "Sulfide-Driven Microbial Electrosynthesis", *Environmental Science & Technology*, 47 (2013) 568–573.
8. X. Zhu, M. Siegert, M. D. Yates, B. E. Logan, "Alamethicin Suppresses

Methanogenesis and Promotes Acetogenesis in Bioelectrochemical Systems”, *Applied Environmental Microbiology*, 81 (2015) 3863–3868.

9. C. Liu, J. J. Gallagher, K. K. Sakimoto, E. M. Nichols, C. J. Chang, M. C. Y. Chang, P. Yang, “Nanowire–Bacteria Hybrids for Unassisted Solar Carbon Dioxide Fixation to Value–Added Chemicals”, *Nano Letters*, 15 (2015) 3634–3639.