

바이오매스 기반 전기에너지 생산기술 동향 분석

이중서^{1)†} · 한상수^{1)†} · 김도연²⁾ · 김주현³⁾ · 박상진^{3)*}

Electrical Energy Production Using Biomass

Jongseo Lee^{1)†} · Sang-Soo Han^{1)†} · Doyeun Kim²⁾ · JuHyun Kim³⁾ · Sangjin Park^{3)*}

Received 30 January 2023 Revised 3 March 2023 Accepted 9 March 2023 Published online 16 March 2023

ABSTRACT Governments and global companies are working towards using renewable sources of energy, such as solar, wind, and biomass, to reduce dependency on fossil fuels. In the defense sector, the new strategy seeks to increase the sustainable use of renewable energy sources to improve energy security and reduce military transportation. Renewable energy technologies are affected by factors such as climate, resources, and policy environments. Therefore, governments and global companies need to carefully select the optimal renewable energy sources and deployment strategies. Biomass is a promising energy source owing to its high energy density and ease of collection and harvesting. Many techniques have been developed to convert the biomass into electrical energy. Recently, diverse types of fuel cells have been suggested that can directly convert the chemical energy of biomass into electrical energy. The recently developed biomass flow fuel cell has significantly enhanced the power density several hundred times, reaching to $\sim 100 \text{ mW/cm}^2$. In this review, we explore various strategies for producing electrical energy from biomass using modern methods, and discuss the challenges and potential prospects of this method.

Key words Biomass(바이오매스), Fuel cell(연료전지), Renewable Energy(재생에너지), Military Operational Energy(운용에너지)

1. 서론

신 기후 체제에서 각국 정부 및 글로벌 기업들은 재생에너지로의 전환을 시도하고 있다. 2014년 영국 CDP(Carbon Disclosure Project) 위원회가 기업들의 활동에 필요한 에너지를 재생에너지를 통해 100% 공급받는 것을 의미하는 RE100(Renewable Energy 100%)을 소개한 후, 이미 150

여 개가 넘는 글로벌 기업들이 재생에너지를 통해 필요한 에너지를 소비하는 것에 대해 자발적인 참여를 선언하였다.^[1] 글로벌 기업들은 RE100이 설정한 바이오매스, 바이오가스, 지열, 태양, 풍력, 수력 등 재생 가능한 에너지원을 통해 생산하기 위해 재생에너지 투자, 사용 확대 및 경쟁력 개선에 몰두하고 있다. 이와 더불어, 세계 각국 정부들은 보조금, 세제 혜택, 및 규제 완화 등의 다양한 우호적인 정책 여건을 조성하여, 기업들의 재생에너지 투자 증진에 이바지해오고 있다. RE100을 주도해온 유럽연합(EU) 중심으로 주변 국가들에 구속력 있는 이행방안 및 계획을 제시하여 아시아, 남미 등 국가들의 참여를 확장하고 있다. 이는 글로벌 구성원으로 공동목표 달성하기 위하여, 전 세계적 재생에너지 보급을 더욱 확대 중이다. 한국도 ‘깨끗하고 안전한 에너지 공급’을 중장기 에너지 정책으로 수립하고 2030년까지 재생에너지 비중을 20% 수준으로 확대 추진

1) Senior Researcher, Chem-Bio Center, Agency for Defense Development (ADD), Korea

2) Research Officers for National Defense, Advanced Defense Science and Technology Research Institute, Agency for Defense Development (ADD), Korea

3) Principal Researcher, Chem-Bio Center, Agency for Defense Development (ADD), Korea

[†]These authors contributed equally to this work.

*Corresponding author: psj@add.re.kr

Tel: +82-42-821-2888 Fax: +82-42-823-3400

하고 있다.

국방 분야에서도 필요에너지의 재생에너지로의 전환을 활발하게 추진하고 있다. 에너지의 녹색화인 친환경 목적도 있지만, 기존 에너지 생산시스템인 화석연료의 의존성이 기술적 취약점으로 대두되고 있기 때문이다.^[2] 특히, 작전 시 화석연료 보급이 어려운 지역과 보급 위험성에 따른 에너지 공급망이 약화 될 우려로 인해 재생에너지원의 활용이 한가지 해답으로 제시되고 있다. 국내 국방부는 2030년까지 연간 전력사용량의 25%를 재생에너지로 충당하는 정책을 펼치고 있다.^[3] 이러한 정책은 친환경적인 장점을 포함하여, 부대별 자체에너지를 생산할 수 있어 에너지 독립성 확보라는 차원에서 에너지 공급의 안정성을 수립할 수 있을 것이다. 이와 더불어 재생에너지원 특유의 분산성을 가지고 있기에 격오지 부대의 전력 공급 문제를 해결할 것으로 기대되고 있다.

재생에너지 보급 확대를 위해서는 재생에너지의 경쟁력 향상이 핵심이다. 재생에너지의 설비효율 기술의 지속적인 발전에 따라 원가경쟁력이 크게 개선되고 있으며, 이와 반대로 기존 에너지원들의 환경부담, 규제강화 등에 따라 경쟁력이 약화하고 있다. 특히, 해외의 경우 태양광, 풍력에 집중하여 투자되어, 태양광의 발전원가가 72% 감소(304 \$/MWh(2009년)→86 \$/MWh(2017년)), 육상풍력의 발전원가는 27% 감소(93 \$/MWh(2009년)→67 \$/MWh(2017년)) 됨에 따라 재생에너지 시장을 견인하고 있다.^[4] 하지만, 국가별로 활용 및 발전 환경이 다르므로, 재생에너지 기술의 단편적 도입에 어려움이 존재한다. 풍력자원이 풍부하고, 넓은 부지가 존재하는 덴마크의 경우 풍력을 기반으로 재생에너지 보급 확대가 가능하다. 중국은 수력, 태양광, 풍력, 태양열, 온수 등 여러 분야를 주도하고 있으며, 일본은 태양광, 독일은 풍력, 영국은 해상풍력의 보급이 활발하게 이루어지고 있다. 하지만, 국내의 경우 기후적인 요소, 유희부지 확보 및 주민 수용성 등으로 인해 재생에너지 비중 확대가 난제로 남아 있다.

재생에너지원 중 하나인 바이오매스는 획득이 쉽고 풍부하며, 변동성 없이 확보할 수 있는 장점이 있다. 특히, 보유하고 있는 에너지가 막대하다는 장점이 있어, 이를 통한 지속 가능한 전기에너지 생산 및 활용이 주목받고 있다. 2012년 기준 국내 재생에너지 비중을 보면, 폐기물(67.77%),

바이오에너지(15.08%)로 1, 2위를 차지하고 있으며 이중 폐기물계, 미이용계 및 자원식물계 바이오매스가 포함되어 있어 바이오매스는 국내 재생에너지 보급에서 광범위한 적용 범위를 가지고 있다는 것을 알 수 있다.^[5]

바이오매스를 재생에너지로 활용하는 기술은 물리학적, 열화학적, 생물화학적 변환기술을 통해 바이오에탄올, 바이오디젤, 바이오가스 등으로 변환하고, 기 발전 시스템에 도입하여 에너지 생산을 하고자 하는 기술들로 발전되었다. 비록 바이오매스 기반 재생에너지 활용기술이 화석연료의 직접 대체재로서 필요성은 존재하지만, 에너지 변환 효율의 관점에서 볼 때, 두 단계, 혹은 그 이상의 여러 단계의 변환이 필요하다는 점에서 효율적이지 못하다.^[5] 또한 수력, 태양광, 풍력, 태양열 등의 재생에너지원으로 직접적 에너지를 생산하는 기술과 달리 공정상 복잡성을 가지기 때문에 기술적 한계에 빨리 도달할 수 있다. 이와 달리, 최근 바이오매스를 직접적으로 산화하여 에너지를 생산하는 방법들이 소개되고 있다. 바이오매스의 직접 에너지 생산 기술의 발전은 국내외의 재생에너지 보급에 있어 중요한 위치를 차지할 것이다.

본 리뷰 논문에서는 지금까지 바이오매스를 기반으로 에너지 생산관점에서 간접적 형태와 최근 대두된 직접적 에너지 생산의 다양한 형태의 기술들을 구분하여 서술하였다. 또한 이를 기반으로 국방 부문에서의 재생에너지 보급 확대와 관련하여, 바이오매스의 활용에 도움이 되고자 하였다.

2. 간접적 형태의 바이오매스 이용 전기 에너지 생산

간접적 형태의 바이오매스 이용은 두 단계의 과정으로 나뉜다. 첫 번째는 바이오매스를 가스화, 액화, 열분해 및 연소시켜 합성가스(Syngas), 생물 오일(Bio-oil), 바이오디젤, 에탄올, 탄화수소, 수소 등의 연료로 사용될 수 있는 2차 생성물로 변환하는 단계이다. 두 번째는 앞선 방식으로 생성된 연료를 이용하여 에너지를 생산하는 단계이다.

2.1 바이오매스의 연료화

2.1.1 직접 연소법

직접 연소법은 바이오매스를 활용할 수 있는 가장 접근

하기 쉬운 방법이다.^[6,7] 화석연료를 활용하는 방식과 유사하게, 바이오매스를 연소시킴으로써 얻어지는 열에너지를 활용하여 이를 직-간접적으로 이용하는 방식이다. 하지만, 화석연료 대비 낮은 에너지 밀도 및 발열량으로 높은 비용을 일으키는 문제가 존재하지만, 목재 폐기물, 농업 부산물, 도시폐기물 등을 열원으로써 활용할 수 있다는 장점이 있어 열병합 발전, 혼합 연소 발전 등의 다양한 방법들이 시도되고 있다.

2.1.2 열화학적 변환(Thermochemical conversion)

바이오매스에 고온(500-1,400°C)의 에너지를 가하여 합성가스(Syngas), 생물 오일(Bio-oil), 바이오숯(Bio-char) 등으로 변환시키는 기술이다.^[8] 반탄화(Torrefaction), 열분해(Pyrolysis), 액화(Liquefaction), 가스화(Gasification) 등을 포함하고 있다.

반탄화는 상대적으로 낮은 온도인 200-300°C 및 산소가 없는 환경에서 운용되는 기술로써, 바이오매스의 수분 및 저 중량의 유기 휘발성 성분을 효과적으로 전처리할 수 있으며, 높은 열용량과 가공성을 가지는 수소성의 고체 연료 및 바이오 숯, 바이오 오일, 바이오가스 등을 만들기에 용이하다.^[9] 그 중 바이오 숯이 대부분의 생성물이며, CO₂, CO, CH₄, H₂ 등을 포함하는 약간의 바이오가스도 발생시킨다.^[9] 반탄화의 메커니즘은 대부분 활성 바이오매스 성분인 헤미셀룰로오스(Hemicellulose)가 분해되면서 발생하며, 온도 구간에서는 셀룰로오스와 리그닌은 덜 활성화 되어있다.^[10]

열분해는 상압에서 운용되는 저 산소 농도에서 열적으로 분해하는 기술이다.^[11] 바이오 숯, 바이오 오일, 수소, 탄화수소, 일산화탄소, 이산화탄소 등의 가스를 발생시킨다. 그리고 생성물은 운용 온도 구간에 따라서 주요 성분이 달라지는데, 450°C 이하에서는 바이오 숯이, 450-800°C 구간에서는 바이오 오일이, 800°C 이상의 구간에서는 가스까지 생성물이 된다.^[12] 열분해는 온도, 시간, 가열 속도, 입자 크기 등의 운용 조건에 따라 느린(Slow) 열분해, 빠른(Fast) 열분해, 순간(Flash) 열분해의 세 가지의 공정으로 나누어지게 된다. 바이오매스의 헤미셀룰로오스(15-30%) 셀룰로오스(40-60%), 리그닌(10-25%)의 세 가지 주요 성분의 열적 거동을 통해 열분해 특성을 분석할 수 있다.^[13]

액화는 고온, 가압 환경에서 이루어지는 1시간 이내의 공정으로 고분자 구조를 액화시켜 바이오매스를 바이오 오일로 만들어내는 기술이다.^[14] 250-374°C, 4-22MPa의 온도 및 압력 조건에서 운용되며, 수증기, 산소 및 질소의 함유량을 올려 질 높은 바이오 오일을 생산할 수 있게 한다.^[15]

가스화는 복잡한 반응, 압력 변화, 열 및 물질 전달을 동반하여 바이오매스를 열화학적으로 변환시키는 기술이다.^[16] 가스화 공정은 산소, 에어, 증기 등의 산화제 및 기화제를 이용하여 탄소질의 고체 연료를 기화된 연료로 만들게 된다. 고정층 및 유동층 가스화기를 이용하여 산화제와 연료 입자들의 반응을 일으키게 된다. 가스화는 기본적으로 건조, 열분해, 연소, 환원의 네 가지의 단계로 이루어져 있다. 건조 과정은 150°C 이하에서 일어나고, 휘발성 물질(Volatile matter)이 날아가는 열분해는 150-700°C, 연료가 산화되면서 발열 반응이 일어나는 연소는 700-1,500°C, 마지막으로 흡열 반응이 일어나는 환원 단계는 800-1,100°C에서 일어나게 된다.^[17]

2.1.3 생화학적 변환(Bio-chemical conversion)

효모(Yeast) 등 발효성 미생물을 이용하여 바이오매스로부터 바이오가스, 에탄올, 수소 등을 생성하는 기술이다. 혐기성분해(Anaerobic digestion), 알코올발효(Alcohol Fermentation), 광생물학적 수소생산(Photobiological hydrogen production) 등을 포함하고 있다.

혐기성 분해는 바이오매스를 발효 분해하여 바이오가스의 형태로 만들 수 있는 기술이다.^[18] 산업 폐수, 음식물 쓰레기, 분뇨, 농업 폐기물, 하수 폐기물 등의 다양한 바이오매스를 이용하여 바이오가스를 생산할 수 있어 상용화의 수준으로 전 세계적으로 운용되고 있다.^[19] 혐기성 분해는 가수분해(Hydrolysis), 발효(Fermentation), 메탄생성(Methanogenesis)의 연속적인 세 단계로 나누어서 진행된다. 가수분해의 단계에서는 복합 화합물이 용해 가능한 당의 형태로 분해된다.^[20] 발효 미생물(Fermentative bacteria)이 알코올, 아세트산, 휘발성 지방산, 그리고 수소와 이산화탄소를 포함하고 있는 가스로 변환하게 된다. 생성된 가스는 주로 메탄(60-70%)과 이산화탄소(30-40%)로 구성된 바이오가스로 대사(Metabolism)가 된다.^[21]

광생물학적 수소생산은 바이오매스로부터 미생물을 이

용하여 수소를 생산하는 방법이다. 녹조류, 남세균, 광합성 미생물, 흑발효균 등을 포함하는 광합성/비 광합성의 미생물들이 수소를 생산하는 데 이용될 수 있다.^[22] 미생물들은 다양한 대사 경로를 통해 수소를 생성할 수 있는 생리와 대사가 있다. 그 중, 미세조류(Microalgae)는 태양광을 이용한 수소생산에 적합한 광합성 미생물의 한 종류이다. 그들은 대기 중의 CO₂ 를 탄소 공급원으로 사용하여 간단한 영양 공급으로도 성장할 수 있고, 태양광의 에너지만으로도 많은 변종을 통해서 수소를 생산하면서 대기 중 질소를 암모니아로도 전환할 수 있다. 다수의 미세조류는 광생물학적 수소생산에 요구되는 강력한 광합성 능력을 갖추고 있다.^[23] 더욱이 이렇게 생산된 수소는 친환경 에너지원으로써 연료전지를 이용한 전력 생산에 이용될 수 있다. 다음 장에서는, 다양한 방법으로 바이오매스로부터 얻어진 연료를 활용할 수 있는 기술에 대해 살펴보고자 한다.

2.2 연료 활용 기술

2.2.1 증기터빈 발전 및 내연기관

화석연료의 연소로 발생시킨 증기를 이용한 터빈 발전은 여전히 전기적 에너지를 생산하기 위한 주요 발전원이다. 하지만, 지구 온난화 문제의 심각성으로 인하여 탄소 배출의 주된 원인이 되는 화석연료의 사용은 규제를 통해 점점 줄어드는 추세다. 바이오매스는 대기로부터 탄소를 흡수한 것을 이용하는 것이기 때문에 탄소 배출의 총량의 관점에서 배출량은 화석연료의 연소에 비하면 미미한 수준이다. 이에 따라 바이오매스를 이용하여 증기터빈 발전을 하고자 하는 시도는 상용화의 수준까지 도달하여 있다. 그 범위에는 바이오매스를 이용한 직접 연소뿐 아니라 열화학적-생화학적 변환 등의 방법으로 얻어진 바이오 연료를 통해 발전하는 것도 포함된다. 대개 바이오매스 기반 발전소는 가스화나 열분해의 전 단계를 거친 후 연소시키기 때문에, 다수의 운용 유닛이 필요하여 그 규모를 거대하게 만든다. 따라서 운용 시 상당한 양의 바이오매스를 요구하게 되고 이는 운용, 운송, 보관 등에 대한 비용의 증가로 이어진다. 이러한 단점들을 극복하기 위한 연구들이 진행 중이다.^[24]

화석연료를 대체하여 탄소 배출을 감축하고자 하는 관점에서 내연기관의 연료로서 바이오매스로부터 얻어진 바이오디젤, 에탄올 등을 이용하고자 하는 연구도 시도되어왔

다.^[25] 바이오디젤은 식용유, 비식용유, 폐식용유 등의 생산 원료가 광범위하고 기존의 디젤 연료의 성능과 유사한 성능 수준을 가진다는 장점이 있어 활용성 측면에서 주목을 받아왔다. 하지만, 배출 가스를 기준으로 디젤 연료보다 CO, 매연 및 미세먼지의 배출은 줄이지만 NO_x 나 CO₂ 의 배출은 증가하는 문제가 있고 식량, 토지, 자원을 이용하여 잠재적으로 식량난을 일으킬 수 있는 윤리적인 문제를 가지고 있어 이에 대한 해결책이 필요하다.

2.2.2 고온 연료전지

연료전지는 연료의 화학적 에너지를 전기적 에너지로 직접 변환할 수 있는 전기화학적 장치이다.^[26] 바이오매스에서 발생한 수소 및 탄화수소 등의 가스화된 연료를 사용하여 600°C 이상의 고온에서 구동하는 고체 산화물 연료전지(Solid oxide fuel cell)(Fig. 1 참조)와 고체 탄소 연료를 직접 사용하는 직접 탄소 연료전지(Direct carbon fuel cell)(Fig. 2 참조)의 두 가지 형태의 연료전지가 포함된다.

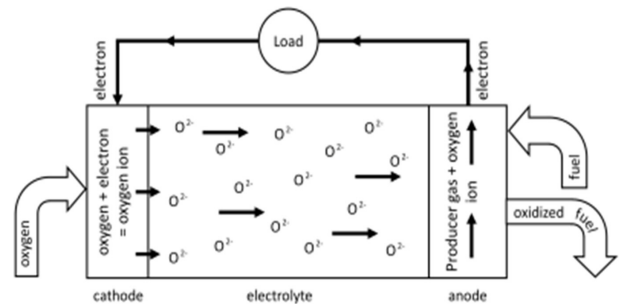


Fig. 1. Schematic of solid oxide fuel cell

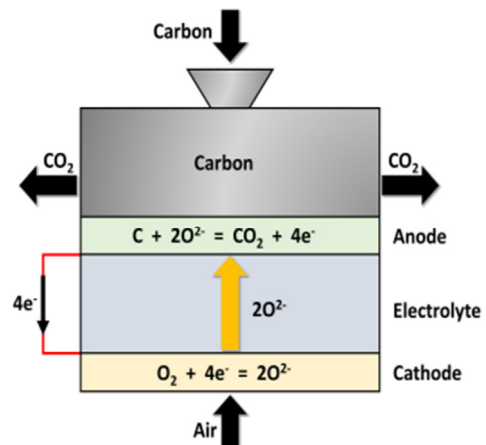


Fig. 2. Schematic of direct carbon fuel cell

고체 산화물 연료전지의 고온 구동 특성은 열역학적 효율을 높일 뿐만 아니라, 내부 개질이 가능하여 탄화수소를 포함하는 연료 가스의 다양한 조성에 대응할 수 있고, 불순물에도 저항성이 높다.^[27] 바이오매스로부터 얻어지는 천연가스, 바이오가스, 합성가스, 수소 등의 가스 형태 연료가 사용할 수 있다. 주로 메탄올을 사용하여 병합된 형태로 시스템에 활용되었으며, 최근에는 리그닌(Lignin)이 내부에서 가스화되어 직접 활용되는 형태도 보고된 바 있다.^[28] 고체 산화물 연료전지의 음극(Anode)에서 공급된 연료가 산화되며, 양극(Cathode)에서 환원되어 전해질을 통해 전도된 산소 이온(O₂⁻)이 산화제의 역할을 하게 된다. 이를 통해 연료는 H₂O, CO, CO₂ 등의 형태로 산화되며, 연료의 산화 반응 및 산소의 환원 반응으로부터 발생한 전위차와 연료 산화를 통해 발생한 전자가 외부회로로 전도됨으로써 전류가 발생하게 되고, 전력을 생산할 수 있게 된다.

직접 탄소 연료전지는 탄소를 직접 연료로 사용하는 방식으로써 발전 효율이 80%에 달할 정도로 매우 높으며, 탄화된 바이오매스인 바이오숯(Biochar)을 이용하여 발전할 수 있다.^[29]

바이오매스를 산화시킨 후 부산물로 높은 순도의 CO₂ 만을 내기 때문에 탄소 포집을 위해 따로 정제 과정을 거치지 않아도 된다.^[30] 이론적으로는 나무, 풀, 농업 부산물, 조류 등의 다양한 형태의 목질계 바이오매스가 사용할 수 있지만, 현재로서는 주로 녹말이나 셀룰로오스 같은 정제된 바이오매스, 혹은 바이오 숯만이 사용되고 있다. 사용되는 연료전지의 전해질의 형태에 따라 수산화물(Hydroxide), 탄산염(Carbonate), 고체 산화물(Solid oxide)의 세 가지 유형으로 나뉜다.^[31] 각각의 유형에 따라 전해질을 통해 전도되는 이온의 형태가 다르고, 이에 따라 양극에서 반응은 다르게 나타난다. 하지만, 높은 효율 및 연료 다양성에도 불구하고, 고온 연료전지에서 탄소가 포함되어있는 연료를 사용할 시 가장 큰 문제는 장기 구동의 안정성이 저해된다는 것이다.^[32] 통상적으로 음극에 사용되는 니켈 촉매는 탄소와의 결합력이 강하여 표면에 탄소가 침착되고, 반응 면적을 잃어버리며, 황 등의 불순물에도 취약하여 산업에서 적용되기에는 상당한 개선이 필요하다.

3. 직접적 형태의 바이오매스 이용 전기 에너지 생산

직접적 형태의 바이오매스 이용 전기에너지 생산기술은 앞에서 살펴본 연료화 과정 없이 바로 연료전지에 바이오매스를 투입하여 전기에너지를 생산하는 방식을 일컫는다. 연료전지의 형태로 바이오매스를 직접 산화시키며 발생하는 전위차 및 전자를 이용하는 형태가 주된 활용 방식으로 연료의 산화 방식에 따라 다양한 형태의 연료전지로 나뉘며, 근래에 새로이 제시되고 있는 연료전지 유형을 포함하고 있다.

3.1 미생물 연료전지(Microbial Fuel Cell)

일부 미생물은 바이오매스를 분해 또는 합성하면서 전자를 외부로 방출하여 에너지를 얻는 방식으로 생존한다. 이와 같은 생명현상을 활용하여 전기에너지를 발생시킬 수 있는 전지 형태가 미생물 연료전지이다(Fig. 3 참조). 미생물이 방출하는 전자로 음극을 산화시키게 되는데, 이와 같은 산화-환원 반응을 이용하여 연료전지를 구성할 수 있다.^[33]

미생물이 음극에 전자를 전달하는 방식은 ‘직접 전달(Direct electron transfer)’과 매개체(Mediator)를 이용한 ‘간접 전자전달(Mediator electron transfer)’이 있다.^[34] 직접 전자전달은 미생물이 나노와이어를 생성하여 음극에 전달하거나 바이오 박막(Biofilm) 형태로 음극에 고착하여 전달하는 방식이다. 반면, 간접 전자전달은 매개체인 미네랄이나 금속 나노물질을 통해 음극으로 전자를 전달하는 방식이다. 미생물 연료전지에 관한 많은 연구가 진행됐지만, 에너지 밀도가 매우 낮아 상용화까지는 상당한 시일이 걸릴

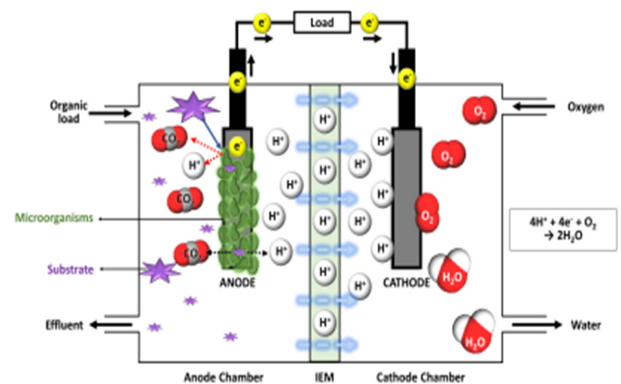


Fig. 3. Schematic of microbial fuel cell

것으로 예상된다. 최근 유전자 공학 및 합성 생물학 기술이 발전함에 따라 ‘전자 생성 미생물(Electricigen)’의 세포변형(Cell transforming)을 통해 전자 방출을 극대화하려는 시도가 있다. 또한, 전자를 수용하는 음극 물질과 매개체의 효율을 극대화하기 위한 나노 물질의 탐색하려는 노력과 미세 유체역학(Microfluid) 기법으로 전지의 전자 집전 구조를 최적화하는 노력이 병행되고 있다.^[35] 한편, 미생물 연료전지의 실용성을 높이기 위하여 난분해성 식물 주성분인 셀룰로오스, 리그닌 등에 대한 전자 생성 미생물 및 생분해(Bio-degradation) 촉진 기술이 요구되고 있다. 흰개미나 반추 동물의 식물 분해 ‘미생물 군집(Microbiome)’이 효과적 대안으로 강구되고 있으나 현재까지 효율은 높지 않은 것으로 알려져 있다.^[36]

3.2 바이오매스 흐름 연료전지(Biomass Flow Fuel Cell)

산화환원 흐름 전지(Redox Flow Cell)의 원리를 이용하여 개량한 연료전지(Fig. 4 참조)의 형태로 2014년 조지아 공과대학의 Yulin Deng 교수에 의해 처음 고안되었다.^[37]

바이오매스 흐름 연료전지는 산화환원 흐름 전지의 전해액 순환 및 산화-환원을 통해 전력을 생산 방식과 바이오매스의 산화를 통한 음극 전해액의 환원 방식을 이용한 새로운 연료전지의 타입이다. 저온(80-100°C)에서 구동함에도 미생물 연료전지의 전력밀도에서 수백 배에 달하는 100 mW/cm² 급의 출력을 달성하였다.^[38] 바이오매스를 산화시키는 부분을 연료전지에서 분리함으로 산화 환경(온도, 촉매 농도 등), 바이오매스의 부산물에 의한 스택의 피독 등에서 벗어나져 비약적인 성능 향상이 가능하였다.^[39]

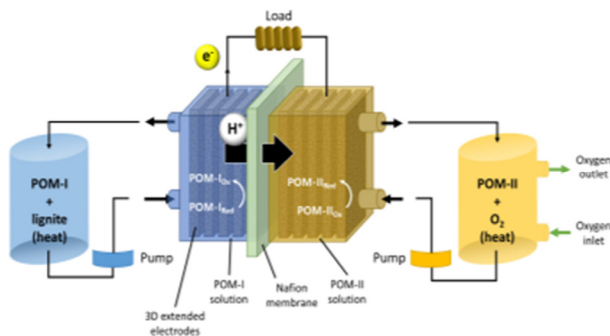
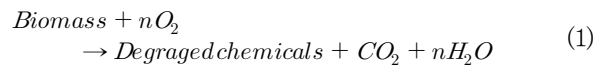


Fig. 4. Schematic of biomass flow fuel cell

특히, 저온에서 구동하면서도 귀금속 촉매를 사용하지 않고 POM 계열의 전해액을 사용함으로써 가격 측면에서도 장점이 있다. POM은 촉매의 역할을 함으로써 바이오매스의 산화를 도울 뿐만 아니라 발생하는 전자를 받는 매개체(Mediator)로써 연료전지의 음극에서 산화되고, 전자를 전달하는 역할을 한다. 그 다음, 생성된 전자는 외부회로를 통해 양극으로 전달되고, 산소에 전달되어 물을 생성하게 된다. 전체적인 반응은 아래 식 (1)과 같이 기술될 수 있다.



이 연료전지 유형의 핵심은 바이오매스의 화학적 에너지를 전기적 에너지로 직접적으로 변환시켜줄 수 있는 촉매 및 산화환원 특성이 활성화되어있는 전해액이다. 촉매가 수용액의 형태로 존재하기 때문에 바이오매스와 촉매가 접촉하는 면적이 극대화될 수 있어 전극 활성 및 연료 공급의 손실로 인해 발생하는 특성이 보이지 않는다. 또한, 물을 포함하고 있는 날 것(Raw)의 바이오매스 형태뿐 아니라 밀짚, 사탕수수, 볏짚, 와인 찌꺼기, 하수 슬러지 등의 폭넓은 바이오매스의 활용이 가능하다.^[40~42]

정리하자면, 바이오매스 흐름 연료전지는 다른 바이오매스 기반 전기에너지 생산기술 대비 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 직접적 형태의 전기에너지 생산 방식이므로 가스화, 열분해와 같은 전처리가 필요하지 않아 단순한 형태의 시스템 구성이 가능하다. 둘째, 500~1,000°C의 고온이 있어야 하는 다른 간접적 전기 생산기술과는 달리 100°C 이하의 상대적으로 낮은 온도에서 구동할 수 있다. 셋째, 출력밀도가 매우 낮아 실용화 수준과는 거리가 먼 직접적 형태의 전기에너지 생산 방식인 미생물 연료전지나 태양광 유도 하이브리드 연료전지와는 달리 비록 실험실 조건이기는 하나 메탄올 연료전지 수준의 전력밀도 달성이 가능하다. 넷째, 고가의 귀금속을 사용하지 않고 저렴한 촉매를 사용하며, 촉매가 독성 유기/무기 물질에 대한 저항성이 크고 식물 원료를 분해하면서 전기를 생산할 수 있다.

높은 수준의 전력밀도 달성을 포함하는 이러한 장점들은

본 기술의 군사적 활용 가능성을 높여주지만, 현재까지 보고된 연구는 실험실에서의 데모 수준이며, 특히 높은 전력 밀도를 시연한 것에 비해 장기 구동에 있어 안정성을 확보할 수 있는지에 대한 검증이 부족한 실정이다. 또한, 바이오매스를 이용한 연료전지의 관점에서는 매우 높은 성능을 보여주고 있지만, 기존에 활용되던 고분자 연료전지(PMFC; Proton electrolyte membrane fuel cell) 등에 비하면 출력이 떨어지는 것이 사실이다.

따라서 기술의 성숙화를 위한 방향은 다음과 같이 예상된다. 바이오매스는 리그닌과 같은 난분해성 성분을 포함하고 있어 변환 효율을 높이기 위한 고성능의 새로운 촉매 개발이 필수적이다. 또한, 바이오매스 산화 시 발생하는 잔여물 및 무기염에 의한 장기 구동에 대한 영향성 또한 제고되어야 한다. 추가로, 전해액 탱크, 연료전지 스택, 구동 조건, 열관리 등을 포함하는 시스템적 접근을 통해 전체 발전 시스템의 설계 및 최적화가 필요한 실정이다. 이러한 점들을 극복할 수 있는 연구 개발이 수반되어야 할 것이다.

4. 결론

현대에 이르러 한 명의 병사가 통신장비를 포함한 다양한 전자 장비 및 웨어러블 장비를 휴대하여 운용하며 72시간 동안 659 W라는 에너지를 소모하고 있다.^[43] 이는 정상적인 전투력을 유지하기 위해서는 지속적이며, 독립적인 에너지 공급이 필요하다는 것을 의미하며, 에너지 보급 문제는 국방 분야에 있어 승패를 좌우하게 만드는 중요한 요소임이 분명하다.

군사 강국에서는 재생에너지의 보급 및 활용을 위한 상용화된 기술들을 기보유하고 있다. 특히 미 국방부는 '지속 가능한 에너지 지원체계'와 같은 대규모 프로젝트를 수년간 진행하고 있으며, 재생에너지 전환기술 및 활용 장비를 개발하는데 100만 달러 이상의 큰 예산을 투입하고 있다. 바이오매스를 활용하는 프로젝트는 Fort Drum Renewable Energy 프로젝트가 대표적인데, 바이오매스 폐기물을 활용하여 직접 연소법을 통해 총 60 MW 전기에너지 생산 플랜트를 건설 운용하고 있다. 이는 6만 가구에 전력을 충분

히 공급할 수 있는 수준이다. 또한, Biofuel 프로그램은 바이오매스로부터 생산된 바이오연료를 군 운용시스템에 도입하고자 하는 프로그램으로, 생산된 생물연료가 미 헬리콥터에 적용하여 운용 가능성을 확인하였다. 태양광을 활용하는 프로젝트중, 대표적으로는 2016년 시작한 Fort Hood Solar 프로젝트는 3,000 개의 태양광 패널을 활용해 1.2 MW를 생산할 수 있는 시설을 성공적으로 구축하였다. 또한 2018년 Camp Lemonnier Solar 프로젝트로 1.6 MW급 태양광 패널을 설치 운용하였다. 이 프로젝트는 부내내 태양광 패널 어레이를 구축하여 필요에너지 상당부분을 공급하는 등 재생에너지 보급 및 활용을 통해 성공적인 에너지 독립성 및 자립성을 확보하였다.^[44,45]

국내의 경우 재생에너지 전환의 본격화는 2018년 '군의 재생에너지 보급 확대를 위한 4주간 업무협약'이 체결되어 후발주자이지만, 재생에너지를 활용한 다양한 군사강국 사례를 검토하여 삼면이 바다이며, 산악지형과 사계절이 뚜렷한 국내 현황을 고려한 한국 특화 재생에너지 전환 전략을 갖출 수 있을 것이다. 바이오매스는 국내 적합성 및 획득용이성이 있어 주목받는 재생에너지원이다. 따라서 바이오매스의 고효율 에너지화 기술이 집중적으로 검토되어야 할 것이다. 기존의 바이오매스 활용은 대부분 다중 공정을 거쳐야 했지만, 최근 바이오매스의 화학적 에너지를 직접적으로 전기적 에너지로 변환시키고자 하는 여러 유형의 연료전지가 제시되어왔다. 그 중, 미생물 연료전지는 수 일~수 주간 연속적으로 전력 생산이 가능하다는 장점이 있지만, 매우 낮은 전력밀도로 실효성이 떨어져 이의 효율을 실용 가능한 범위로 올리기 위한 연구가 필요하다. 그럼에도 불구하고 글로벌 시장에서 상당한 관심을 받아왔다. 이를 비추어 보았을 때, 바이오매스 흐름 연료전지의 출력은 미생물 연료전지와 비교해 수백 배 이상으로 보고되고 있다. 따라서, 기술이 성숙화된다면 바이오매스 기반 전기에너지 생산 시장에서 선도적인 기술이 될 것이며, 한국 특화 재생에너지 전환기술의 발판으로 제시될 수 있을 것이다. 또한, 국방 분야에서도 부대별 에너지 독립성 확보, 격오지 부대의 전력 공급 문제를 해결할 수 있는 K-국방에너지 지원체계를 구축할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2021년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구입니다(915009201).

References

- [1] Bae, J.H., Kim, H.W., Shin, D.W., Kim, D.W., Kim, J.W., Lee, S.J., Lee, J.Y., Lee, S.H., Lee, S.W., and Nam, S.U., 2021, "Impacts of the RE100 initiative on major Korean export industries", KDI School of Public Policy and Management, file:///C:/Users/KSNRE/Downloads/2_White+Paper-The+Effect+of+RE100+on+Korean+Exports_20230314.pdf.
- [2] Lovins, A.B., 2010, "DOD's energy challenge as strategic opportunity", Joint Force Quarterly, **57**, 33-42, https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/05/RMI_Document_Repository_Public-Reperts_JFQ57_Lovins_unabridged.pdf.
- [3] David S., E., Steven B., S., R.S., B., and Scott H., D., 2009, "Sustain the mission project: Casualty factors for fuel and water resupply convoys", Army environmental policy institute, <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADB356341.pdf>.
- [4] Korea SMEs and Startups Agency (KOSME), 2019, "Renewable energy centered on solar and wind", KOSME Industry analysis reports No. 2019-6, https://www.mss.go.kr/cmm/fms/FileDown.do?atchFileId=FILE_00000001003796&fileSn=1.
- [5] Yoon, Y.M., 2014, "Domestic biomass utilization status and activation plan", World agriculture, **162**, 73-97, <http://repository.krei.re.kr/handle/2018.oak/20627>.
- [6] Zhang, L., Xu, C., and Champagne, P., 2010, "Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass", Energy Conv. and Manag., **51**(5), 969-982.
- [7] Demirbas, A., 2007, "Combustion systems for biomass fuel", Energ. Source Part A, **29**(4), 303-312.
- [8] Ong, H.C., Chen, W.H., Farooq, A., Gan, Y.Y., Lee, K.T., and Ashokkumar, V., 2019, Ashokkumar, "Catalytic thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A comprehensive review", Renew. Sust. Energ. Rev., **113**, 109266.
- [9] Chen, W.H., Huang, M.Y., Chang, J.S., and Chen, C.Y., 2015, "Torrefaction operation and optimization of microalga residue for energy densification and utilization", Appl. Energy, **154**, 622-630.
- [10] van dar Stelt., M.J.C., Gerhauser, H., Kiel, J.H.A., and Ptasinski, K.J., 2011, "Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review", Biomass and Bioenergy, **35**(9), 3748-3762.
- [11] Bach, Q.V., and Chen, W.H., 2017, "Pyrolysis characteristics and kinetics of microalga via thermogravimetric analysis (TGA): A state-of-the-art review", Bioresour. Technol., **246**, 88-100.
- [12] Jahirul, M.I., Rasul, M.G., Chowdhury, A.A., and Ashwath, N., 2012, "Biofuels production through biomass pyrolysis -A technological review", Energies, **5**(12), 4952-5001.
- [13] Wang, S., Dai, G., Yang, H., and Luo, Z., 2017, "Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A sate-of-the-art review", Prog. Energy Combust. Sci., **62**, 33-86.
- [14] Yang, J., He, Q., and Yang, L., 2019, "A review on hydrothermal co-liquefaction of biomass", Appl. Energy, **250**, 926-945.
- [15] Chen, W.H., Lin, Y.Y., Liu, H.S., Chen, T.C., Hung, C.H., Chen, C.H., and Ong, H.C., 2019, "A comprehensive analysis of food waste derived liquefaction bio-oil properties for industrial application", Appl. Energy, **237**, 283-291.
- [16] Wei, J., Gong, Y., Guo, Q., Chen, X., Ding, L., and Yu, G., 2019, "A mechanism investigation of synergy behavior variations during blended char co-gasification of biomass and different rank coals", Renew. Energy, **131**, 597-605.
- [17] Basu, P., 2006, "Combustion and gasification in fluidized beds", 1st edition, Taylor & Francis Group, USA.
- [18] Cheng, C.L., Lo, Y.C., Lee, K.S., Lee, D.J., Lin, C.Y., and Chang, J.S., 2011, "Biohydrogen production from lignocellulosic feedstock", Bioresour. Technol., **102**(18), 8514-8523.
- [19] Sawatdeenarunat, C., Surendra, K.C., Takara, D., Oechsner, H., and Khanal, S.K., 2015, "Anaerobic digestion of lignocellulosi biomass: Challenges and opportunities", Bioresour. Technol., **178**, 178-186.
- [20] Singh, A., and Olsen, S.I., 2011, "A critical review of

- biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels”, *Appl. Energy*, **88**(10), 3548-3555.
- [21] Cantrell, K.B., Ducey, T., Ro, K.S., and Hunt, P.G., 2008, “Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities”, *Bioresour. Technol.*, **99**(17), 7941-7953.
- [22] Khetkorn, W., Rastogi, R.P., Incharoensakdi, A., Lindblad, P., Madamwar, D., Pandey, A., and Larroche, C., 2017, “Microalgal hydrogen production-A review”, *Bioresour. Technol.*, **243**, 1194-1206.
- [23] He, S., Fan, X., Luo, S., Katukuri, N.R., and Guo, R., 2017, “Enhanced the energy outcomes from microalgal biomass by the novel biopretreatment”, *Energy Convers. Manage.*, **135**, 291-296.
- [24] Liu, W., Liu, C., Gogoi, P., and Deng, Y., 2020, “Overview of biomass conversion to electricity and hydrogen and recent developments in low-temperature electrochemical approaches”, *Engineering*, **6**(12), 1351-1363.
- [25] Mofijur, M., Rasul, M.G., Hyde, J., Azad, A.K. Mamat, R., and Bhuiya, M.M.K., 2016, “Role of biofuel and their binary (diesel-biodiesel) and ternary (ethanol-biodiesel-diesel) blends on internal combustion engines emission reduction”, *Renew. Sust. Energy Rev.*, **53**, 265-278.
- [26] Wachsmann, E.D., and Lee, K.T., 2011, “Lowering the temperature of solid oxide fuel cells”, *Science*, **334**(6058), 935-939.
- [27] Sucipta, M., Kimijima, S., and Suzuki, K., 2007, “Performance analysis of the SOFC-MGT hybrid system with gasified biomass fuel”, *J. Power Sources*, **174**(1), 124-135.
- [28] Zhao, X., and Zhu, J.Y., 2016, “Efficient conversion of lignin to electricity using a novel direct biomass fuel cell mediated by polyoxometalates at low temperatures”, *ChemSusChem*, **9**(2), 197-207.
- [29] Jiang, C., Ma, J., Corre, G., Jain, S.L., and Irvine, J.T.S., 2017, “Challenges in developing direct carbon fuel cells”, *Chem. Soc. Rev.*, **46**(10), 2889.
- [30] Giddey, S., Badwal, S.P.S., Kulkarni, A., and Munnings, C., 2012, “A comprehensive review of direct carbon fuel cell technology”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **38**(3), 360-399.
- [31] Gur, T.M., 2013, “Critical review of carbon conversion in carbon fuel cells”, *Chem. Rev.*, **113**(8), 6179-6206.
- [32] Elleuch, A., Boussetta, A., Halouani, K., and Li, Y., 2013, “Experimental investigation of direct carbon fuel cell fueled by almond shell biochar: Part II. improvement of cell stability and performance by a three-layer planar configuration”, *Int. J. Hydrog. Energy*, **38**(36), 16605-16614.
- [33] Palanisamy, G., Jung, H.Y., Sadhasivam, T., Kurkuri, M.D., Kim, S.C., and Roh, S.H., 2019, “A comprehensive review on microbial fuel cell technologies: Processes, utilization, and advanced developments in electrodes and membranes”, *J. Clean Prod.*, **221**, 598-621.
- [34] Mohan, S.V., Velvizhi, G., Modestra, J.A., and Srikanth, S., 2014, “Microbial fuel cell: critical factors regulating bio-catalyzed electrochemical process and recent advancements”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **40**, 779-797.
- [35] ElMekawy, A., Hegab, H.M., Dominguez-Benetton, X., and Pant, D., 2013, “Internal resistance of microfluidic microbial fuel cell: Challenges and potential opportunities”, *Bioresour. Technol.*, **142**, 672-682.
- [36] Lesnik, K.L., and Liu, H., 2014, “Establishing a core microbiome in acetate-fed microbial fuel cells”, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **98**(9), 4187-4196.
- [37] Liu, W., Mu, M., and Deng, Y., 2014, “High-performance liquid-catalyst fuel cell for direct biomass into electricity conversion”, *Angew. Chem.*, **126**(49), 13776-13780.
- [38] Liu, C., Zhang, Z., Liu, W., Xu, D., Guo, H., He, G., Li, X., and Deng, Y., 2018, “Flow fuel cell powered by combustible agricultural waste”, *Clean Energy*, **2**(1), 20-28.
- [39] Liu, W., Gong, Y., Tricker, A., Wu, G., Liu, C., Chao, Z., and Deng, Y., 2020, “Fundamental study toward improving the performance of a high moisture biomass-fueled redox flow fuel cell”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **59**(10), 4817-4828.
- [40] Zhang, Z., Liu, C., Liu, W., Du, X., Cui, Y., Gong, J., Guo, H., and Deng, Y., 2017, “Direct conversion of sewage sludge to electricity using polyoxometalate catalyzed flow fuel cell”, *Energy*, **141**, 1019-1026.
- [41] Ding, Y., Du, B., Zhao, X., Zhu, J.Y., and Liu, D., 2017, “Phosphomolybdic acid and ferric iron as efficient electron mediators for coupling biomass pretreatment

- to produce bioethanol and electricity generation from wheat straw”, *Bioresour. Technol.*, **228**, 279-289.
- [42] Zu, X., Yang, Z., Sun, L., Lin, W., Yi, G., Zheng, X., Li, W., Deng, Y., and Xiao, J., 2020, “Ferric-ferrous redox couple mediated low temperature symmetric flow fuel cell for direct conversion of biomass residues into electricity”, *J. Power Sources*, **448**, 227441.
- [43] Taylor, P.J., 2011, “Review of interests and activities in thermoelectrics”, RDECOM ARL, <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA556889.pdf>.
- [44] Brown, S.A., Hand, J.R., Orrell, A.C., Russo, B.J., Solana, A.E., Weimar, M.R., Williamson, J.L., Rowley, S.E., and Nesse, R.J., 2010, “Renewable energy opportunities at fort drum, New York”, U.S. Department of Energy, https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-19886.pdf.
- [45] Greenley, H.L., 2019, “Department of defense energy management: Background and issues for congress”, Congressional Research Service.