

바이오리파이너리를 이용한 바이오연료 및 바이오화합물의 생산

이채영¹ · 한선기^{2†}

¹수원대학교 토목공학과·하천환경기술연구소, ²한국방송통신대학교 환경보건학과

Production of Biofuels and Biochemicals by Biorefinery

CHAE-YOUNG LEE¹, SUN-KEE HAN^{2†}

¹Dept. of Civil Engineering-Institute of River Environment Technology, The University of Suwon,
17 Wauan-gil, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea

²Dept. of Environmental Health, Korea National Open University, 86 Daehak-ro, Jongno-gu, Seoul, Korea

Abstract >> The authors reviewed information about biorefining of biomass by using academic information databases. Feedstocks were classified into triglycerides biomass, sugar biomass, starchy biomass, lignocellulosic biomass, and organic waste biomass. Biorefinery is an integrated system converting biomass into biofuels and biochemicals by various physical, chemical, biological, and thermochemical technologies. This paper presented a comprehensive summaries of opportunities, recent trends and challenges of biorefinery. A brief overview of promising building blocks, their sources from biomass, and their derivatives were also provided. In conclusion, this paper demonstrated the feasibility of biorefinery producing biofuels and biochemicals from biomass.

Key words : Biomass(바이오매스), Biofuels(바이오연료), Biochemicals(바이오화합물), Biorefinery(바이오리파이너리), Building blocks(중간 바이오화합물)

1. 서 론

현대사회는 화석연료, 특히 석유에 크게 의존하고 있다. 석유가 보급됨에 따라서 연료분야, 소재분야, 화학제품분야 등에 커다란 변화가 나타났고, 그로 인해 우리는 석유를 떼어놓고는 생활을 영위할 수 없을 만큼 석유와 불가분의 관계를 유지하고 있다.

하지만 석유는 무한한 자원이 아니다. 우리나라는 석유의 전량을 수입에 의존하는 취약한 사회구조를

가지고 있으며, 또한 전 지구적 관점에서 본다고 해도 세계자원연구소(world resource institute)에 의하면 석유의 수명을 향후 약 40년 정도로 예견하고 있다¹⁾.

또한 석유의 사용은 지구온난화에 따른 기후변화를 유발하고 있다. 우리나라는 지구온난화의 영향으로 지난 40년간 남한 지표면의 기온은 약 1.3°C, 해양 표층의 수온은 약 1.0°C 상승하여, 세계에서 수온 상승이 가장 빠른 곳 중의 하나가 되었다¹⁾. 또한 지구온난화에 따라 지구 평균기온이 1880년 이후 2012년까지 약 0.85°C 증가했으며, 지구 평균해수면은 1901년 이후 2010년까지 약 19 cm 상승했다. 만약 현재와 같은 추세로 온실가스를 배출한다면, 21세기

[†]Corresponding author : skhan003@knu.ac.kr

Received : 2016.10.13 in revised form : 2016.11.7 Accepted : 2016.12.30

Copyright © 2016 KHNES

말에는 극심한 기후변화로 인해 수많은 지역이 물에 잠기고 많은 인류가 가뭄과 홍수, 혹한, 폭설 등의 피해를 입을 것으로 전망되고 있다²⁾.

따라서 우리는 친환경적으로 지속가능한 사회로의 전환을 위해서 새로운 대안이 필요한 상황이며, 그 대안으로 바이오매스(biomass)가 떠오르고 있다³⁻⁷⁾. 사용 후 재생이 불가능한 석유에 비해서 바이오매스는 일정한 시간 후 재생이 가능하다. 그리고 거의 무한하다고 할 만큼 풍부한 자원이며 재생되는 시간이 상대적으로 빠른 장점이 있다. 또한 바이오매스를 이용하는 과정에서 이산화탄소가 배출될 수밖에 없지만, 바이오매스가 생산되는 과정에서 광합성을 통해 이산화탄소를 흡수하기 때문에 탄소중립적인 특징이 있다^{8,9)}.

따라서 이러한 바이오매스로부터 바이오연료 및 바이오화합물을 생산하는 바이오리파이너리(biorefinery)에 대해서 그 개념과 다양한 주요산물, 그리고 기술의 제한점 등을 살펴보고자 한다.

2. 바이오리파이너리의 개념

바이오리파이너리는 물리적, 화학적, 생물학적 및 열화학적 기술 등을 이용하여 바이오매스로부터 재생 가능한 바이오연료 및 바이오화합물 등을 생산하는 것이다^{4,6,8,10,11)}. Fig. 1에 바이오리파이너리의 개요가 잘 나타나 있다.

바이오매스는 광합성에 의해서 생성되는 식물체 및 미생물 균체, 그리고 이를 섭취해서 살아가는 동물체를 포함한 전체 생물유기체를 의미한다^{3,9,12)}. 다시 말하면 미생물, 식물, 동물이 직접 생산한 물질은 물론이고 그로부터 유래한 모든 물질을 포함하는 것으로, 한마디로 정리하면 재생가능한 모든 유기물질이라고 할 수 있다.

그 종류를 살펴보면, 첫째 유지계 바이오매스(triglycerides biomass)에는 유채씨, 대두, 폐식용유,

동물성 지방, 해조류 등이 있고, 둘째 당질계 바이오매스(sugar biomass)에는 사탕수수, 사탕무 등이 있으며, 셋째 전분질계 바이오매스(starchy biomass)에는 밀, 보리, 옥수수, 감자 등이 있고, 넷째 목질섬유소계 바이오매스(lignocellulosic biomass)에는 초본, 볏짚, 왕겨, 임목 등이 있으며, 그리고 다섯째 유기성 폐기물계 바이오매스(organic waste biomass)에는 음식물류 폐기물, 하수슬러지, 가축분뇨 등이 있다⁵⁻⁷⁾.

기존의 오일 리파이너리(oil refinery)가 원유로부터 다양한 연료와 화합물 등을 통합적으로 생산하는 것처럼 바이오리파이너리도 바이오매스로부터 다양한 바이오연료 및 바이오화합물 등을 통합적으로 생산한다^{10,11)}.

하지만 다음과 같은 차이점이 있다(Table 1). 첫째, 오일 리파이너리는 균질한(homogeneous) 원유를 사용하지만, 바이오리파이너리는 일반적으로 비균질한(heterogeneous) 바이오매스를 이용하여 전처리가 복잡하고 비용이 많이 소요된다. 둘째, 오일 리파이너리의 원료인 원유는 재생이 불가능하며 이용 시 이산화탄소를 발생시켜 지구온난화를 유발하지만, 바이오리파이너리의 원료인 바이오매스는 재생이 가능하며 광합성의 결과로서 생성되기 때문에 대기 중 이산화탄소의 농도를 증가시키지 않아 탄소중립적이다. 그리고 셋째, 오일 리파이너리는 휘발유(gasoline), 등유(kerosene), 경유(diesel oil), 중유(heavy oil) 등과 같은 연료와 함께 에틸렌(ethylene), 프로필렌(propylene), 부틸렌(butylene), BTEX (benzene, toluene, ethyl benzene, xylene) 등을 화합물로 생산하지만, 바이오리파이너리는 바이오에탄올(bioethanol), 바이오부탄올(biobutanol), 바이오디젤(biodiesel), 바이오메탄(biomethane), 바이오수소(biohydrogen) 등과 같은 바이오연료와 함께 숙신산(succinic acid), 3-HPA(3-hydroxypropionic acid), 레블린산(levulinic acid), FDCA(furan-2,5-dicarboxylic acid), 글리세롤(glycerol), 소르비톨(sorbitol), 자일리톨(xylitol) 등을 바이오화합물로 생산한다^{10,13)}.

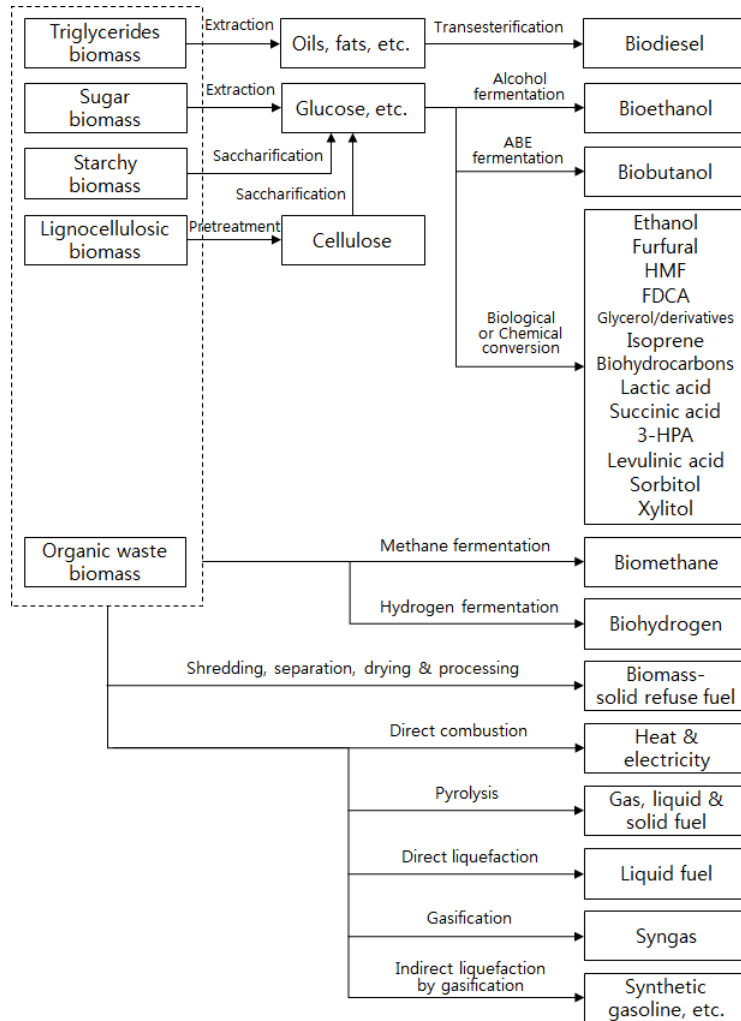


Fig. 1 Schematic diagram of biorefinery (adapted from [3])

Table 1 Comparison of oil refinery and biorefinery (adapted from [10])

	Oil refinery	Biorefinery
Feedstock	Homogeneous petroleum	Heterogeneous biomass
Fuel	Gasoline, kerosene, diesel oil, heavy oil, etc.	Bioethanol, biobutanol, biodiesel, biomethane, biohydrogen, etc.
Compound	Ethylene, propylene, butylene, BTEX (benzene, toluene, ethyl benzene, xylene), etc.	Succinic acid, 3-HPA, levulinic acid, FDCA, glycerol, sorbitol, xylitol, etc.

3. 바이오리파이너리의 주요산물

3.1 화학적 전환으로 생산되는 바이오연료

바이오디젤은 산, 염기 또는 효소 촉매 하에서 자연에 존재하는 각종 동식물성 기름을 메탄올과 함께 에스테르 교환반응(transesterification)을 시켜서 생산되는 액체연료이다. 보통 반응속도가 빠른 염기 촉매를 가장 많이 이용한다. 동식물성 기름인 트리글리세

리드(triglyceride)의 1몰은 염기 촉매 하에서 3몰의 메탄올과 반응하여 3몰의 지방산 메틸에스테르(fatty acid methyl ester)와 1몰의 글리세롤을 만들어 내는데, 여기에서 지방산 메틸에스테르가 경유와 성질이 유사한 바이오디젤이다^{10,14}. 바이오디젤은 기존 연료 보급 시설을 활용하여 운반 및 판매가 가능하고, 기존 디젤엔진을 그대로 사용하며, 경유보다 인화점이 높아 불이 잘 붙지 않고, 경유와 달리 생분해가 가능하며, 독성이 없고, 연소 시 대기오염물질의 배출이 크게 저감된다^{3,4,14}. 한편, 부산물인 글리세롤은 계면활성제, 화장품, 의약품, 감미제, 식품제조용 첨가제 등으로 재활용될 수 있다¹². 그리고 생촉매 하에서 글리세롤로부터 생산되는 글리세롤 카보네이트(glycerol carbonate)와 3-HPA는 각각 의학 산업용 용제와 아크릴 수지용 중간체로 활용될 수 있어 바이오디젤 생산비용을 15% 이상 절감할 수 있다¹⁵.

3.2 생물학적 전환으로 생산되는 바이오연료

바이오에탄올은 당질계 바이오매스로부터 당액을 추출한 후, 알코올 발효(alcohol fermentation)를 시켜서 생산되는 액체연료이다. 그리고 전분질계 바이오매스를 이용하는 경우에는 당화(saccharification)를 통해서, 목질섬유소계 바이오매스를 이용하는 경우에는 전처리 후 당화를 통해서 바이오매스 내 탄수화물을 포도당 및 환원당으로 전환시킨 다음, 알코올 발효를 시켜서 생산해 내는 액체연료이다¹². 여기에서 당화는 산이나 효소를 이용하여 탄수화물을 포도당 및 환원당으로 가수분해하는 것이다. 산은 묽은 산이나 농축된 산이 이용되며, 효소는 전분(starch)에 대해서는 아밀라아제(amylase), 셀룰로오스(cellulose)에 대해서는 셀룰라아제(cellulase), 헤미셀룰로오스(hemicellulose)에 대해서는 자일라나아제(xylanase)가 이용된다. 알코올 발효는 산소가 없는 상태에서 효모(*Saccharomyces cerevisiae*)나 세균(*Zymomonas mobilis*)

과 같은 미생물을 이용하여 포도당 및 환원당을 바이오에탄올로 전환시키는 것이다³. 바이오에탄올은 가스홀(gashol), ETBE(ethyl tertiary butyl ether), 수화에탄올 등으로 사용될 수 있다. 가스홀은 휘발유(90%)와 바이오에탄올(10%)의 혼합물이며, ETBE는 바이오에탄올과 석유가스 등을 혼합한 친환경 연료 첨가제이고, 수화에탄올은 바이오에탄올(95%)과 물(5%)의 혼합물이다. 그리고 바이오에탄올은 기존 연료보급 시설을 그대로 활용하며, 증발잠열 및 옥탄가가 높고, 엔진효율이 높으며, 공연비(air/fuel ratio)가 낮고, 연소 시 대기오염물질의 배출이 크게 저감된다⁵.

바이오부탄올은 탄수화물(포도당, 녹말 등)의 ABE 발효(acetone-butanol-ethanol fermentation)를 통해서 생산되는 액체연료이다. 세균(*Clostridium acetobutylicum*)을 이용하여 포도당, 녹말 등으로부터 바이오아세톤, 바이오부탄올, 바이오에탄올이 각각 3:6:1의 비율로 생산되는데, 기본 반응은 알코올 발효와 비슷하다¹². 가장 많은 양(60%)이 생산되는 바이오부탄올은 바이오에탄올 보다 더 나은 성능의 액체연료이다. 바이오부탄올은 에너지 밀도가 높고, 비식용 바이오매스를 이용하며, 휘발유와 유사하여 기존 연료보급 시설을 활용하여 운반 및 판매가 가능하고, 기존 가솔린엔진을 그대로 사용하며, 휘발유에 혼합이 잘 되고, 휘발유와 혼합사용 시 연비손실이 적으며, 물의 존재 시 상분리가 발생하지 않고, 연소 시 대기오염물질의 배출이 크게 저감된다⁸. 한편, 같이 생산되는 바이오아세톤은 용제로, 바이오에탄올은 액체연료로 사용된다.

바이오메탄은 각종 바이오매스의 메탄발효를 통해서 얻어지는 기체연료이다. 중온조건에서 유기물이 가수분해(hydrolysis), 산생성(acidogenesis), 초산생성(acetogenesis) 및 메탄생성(methanogenesis)의 혐기성 분해과정을 거치면서 최종적으로 바이오메탄이 생산된다¹⁶. 가수분해는 복합유기물질(탄수화물, 지방, 단백질 등)이 단순유기물질(포도당, 지방산, 아미노산 등)로 전환이 되는 것이고, 산생성은 단순유기

물질이 다양한 유기산(volatile fatty acids)으로 전환이 되는 것이며, 초산생성은 다양한 유기산이 초산(acetic acid)과 수소로 전환이 되는 것이고, 메탄생성은 초산과 수소가 메탄가스로 전환이 되는 것이다. 초산생성균은 수소소비 메탄생성균과 공생관계에 있는데, 초산생성균이 선호하는 낮은 수소분압이 수소를 이용하여 메탄을 생성하는 수소소비 메탄생성균에 의해서 이루어진다¹⁷⁾. 메탄발효는 산소의 공급이 필요 없어 운전비용이 저렴하고, 메탄가스를 회수하여 대체에너지로 이용할 수 있으며, 세포수율이 낮아 슬러지 발생량이 상대적으로 적고, 고농도 유기성폐기물을 처리할 수 있는 장점이 있다¹⁸⁾.

바이오수소는 각종 바이오매스의 혐기성 수소발효를 통해서 얻어지는 기체연료이다. 열처리(90~100°C, 10분 이상)를 통해서 선별된 수소발효균(*Clostridium butyricum*)이 중온 및 최적 pH(4.5~5.5)의 조건에서 유기물로부터 바이오수소를 생산한다¹⁹⁾. 혐기성 수소발효는 광합성 수소발효와 비교 시, 반응속도가 빠르고, 반응조가 작고 간단하며, 태양광이 필요치 않고, 산소에 의한 제한이 없으며, 유기성 폐자원을 처리함과 동시에 바이오수소를 생산할 수 있다²⁰⁾. 다만, 바이오수소와 함께 유기산이 생성되기 때문에, 이에 대한 후처리가 필요하다. 후처리 방법에는 다음과 같은 방법이 있다. 첫째, 앞서 설명한 메탄발효를 이용하여 유기산으로부터 추가적으로 바이오메탄을 생산할 수 있다. 둘째, 미생물 연료전지(microbial fuel cell, MFC)를 이용하여 유기산으로부터 추가적으로 전기를 생산할 수 있다. MFC는 전기화학적 활성을 지닌 혐기성 미생물의 촉매작용을 이용하여 유기물에 함유된 화학에너지로 직접 전기에너지로 전환시키는 것이다. 그리고 셋째, 미생물 전해전지(microbial electrolysis cell, MEC)를 이용하여 유기산으로부터 추가적으로 수소를 생산할 수 있다. MEC는 MFC의 구조 및 운전방법을 간단히 변형함으로써 전기 대신 높은 수율의 수소를 얻는 것이다.

즉, 환원전극에 대한 산소공급을 중단하고 전기회로에 약간의 전압을 공급하면 환원전극으로부터 수소가 생산된다²¹⁾.

3.3 물리적 전환으로 생산되는 바이오연료

바이오 고형연료제품(biomass-solid refuse fuel, BIO-SRF)은 바이오매스를 파쇄, 선별, 건조 및 성형 등의 과정을 거쳐 생산되는 고체연료이다. 성형을 거치면 그 크기가 직경 5 cm 이하 및 길이 10 cm 이하로 유지되며(성형을 거치지 않으면 그 크기가 가로 12 cm 이하 및 세로 12 cm 이하로 유지), 수분은 10%(중량비) 이하로 유지되고, 저위발열량은 제조 고형연료제품인 경우에는 최소 3,000 kcal/kg 이상(수입 고형연료제품인 경우에는 최소 3,150 kcal/kg 이상)으로 유지된다. 코르크나 펠릿 형태로 제작돼 전용발전소, 산업용 보일러 등에서 다양하게 이용된다. BIO-SRF에는 폐지류, 농업폐기물, 폐목재류(침목, 전신주 제외), 식물성 잔재물(음식물류폐기물 제외), 초분류 폐기물 등이 포함된다²²⁾.

3.4 열화학적 전환으로 생산되는 바이오연료 및 바이오화합물

직접연소는 바이오매스를 직접 태우는 것이다. 이때 발생하는 열을 바로 이용하거나 또는 그 열로 수증기를 만들어 터빈을 돌림으로써 전기를 생산할 수 있다.

열분해는 무산소이거나 저산소인 상태에서 바이오매스를 가열하여 고체, 액체 및 기체연료를 생산하는 것이다. 저온 열분해(약 500~900°C)에서는 고체 및 액체 연료가 많이 생성되며, 고온 열분해(약 1,100~1,500°C)에서는 기체연료가 많이 생성된다¹⁸⁾.

직접액화는 목질계 바이오매스를 분쇄나 탈수한 후, 알칼리 금속염 촉매 하에서 고온 및 고압으로 반응을 시켜 액체연료를 생산하는 것이다³⁾.

직접가스화는 고온에서 바이오매스에 공기, 산소, 수증기 등의 가스화제를 단독 또는 서로 배합하여 작용시켜 수소, 일산화탄소, 메탄 등을 주성분으로 하는 합성가스를 얻는 것이다^{3,23)}.

가스화를 통한 간접액화는 가스화를 통해서 얻어진 합성가스를 이용하여 메탄올, 합성가솔린 등을 생산하는 것이다. 메탄올은 Cu-Zn 혼합금속 촉매를 이용하여 기체상 고온, 고압의 조건에서 합성가스로부터 생산이 된다. 합성가솔린은 F-T(Fischer-Tropsch)와 MTG(methanol to gasoline)법 등이 있다. F-T법은 Fe, Co, Ru 등의 촉매를 사용하여 고온, 고압의 조건에서 합성가스로부터 합성가솔린이 만들어지고, MTG법은 합성가스로부터 메탄올을 합성한 후 제올라이트 촉매 하 고온, 고압의 조건에서 메탄올로부터

합성가솔린이 만들어진다^{3,10,23)}.

3.5 생물학적 또는 화학적 전환으로 생산되는 바이오 화합물

미국 에너지부(Department of Energy)의 에너지효율 및 재생에너지국(Energy Efficiency and Renewable Energy Office)에서 2004년에 발간한 ‘Top Value Added Chemicals from Biomass-Volume 1’을 보면 바이오매스로부터 다양한 화학제품이 생산될 수 있음을 알 수 있다^{12,13)}. Table 2에서 보는 바와 같이 바이오매스 원료(전분, 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스)의 당화를 통해 포도당, 과당(fructose), 자일로오스(xylose), 아라비노오스(arabinose), 젓당(lactose), 자당(sucrose)을 얻

Table 2 Top 12 building blocks produced from biomass by biorefinery and their derivatives (adapted from [13])

Biomass feedstocks	Intermediate platforms	Building blocks	Derivatives
Starch	Glucose	Glycerol	Glyceric acid, glycidol, 1,3-propanediol, propylene glycol, glycerol carbonate, propanol, diglyceraldehyde, mono-, di-, or triglycerate, branched polyesters and nylons etc.
		3-hydroxypropionic acid	1,3-propanediol, acrylic acid, methyl acrylate, malonic acid, acrylamide, propiolactone, acrylonitrile etc.
		1,4-diacids (succinic, fumaric and malic acids)	g-butyrolactone, 1,4-butanediol, succindiamide, tetrahydrofuran, 1,4-diaminobutane, 2-pyrrolidone, succinonitrile, 4,4-bionolle etc.
		3-hydroxy-butyrolactone	3-hydroxytetrahydrofuran, g-butenyl-lactone, 3-aminotetrahydrofuran, epoxy-lactone, 2-amino-3-hydroxy tetrahydrofuran, acrylate-lactone etc.
Cellulose	Xylose	Aspartic acid	3-aminotetrahydrofuran, amino- -butyrolactone, 2-amino-1,4-butanediol, aspartic anhydride, amino-2-pyrrolidone etc.
		Itaconic acid	2-methyl-1,4-butanediamine, itaconic diamide, 3-methylpyrrolidine etc.
Hemicellulose	Arabinose	Levulinic acid	g-valerolactone, angelilactones, acrylic acid, 1,4-pentanediol, levulinate esters, d-aminolevulinate, b-acetylacrylic acid, diphenolic acid etc.
		Glutamic acid	Glutaminol, glutaric acid, norvoline, 1,5-pentandiol, 5-amino-1-butanol, pyroglutaminol, proline, prolinol, pyroglutamic acid, polyglutamic acid etc.
	Sucrose	Xylitol /arabinitol	Xylaric acid, propylene glycol, ethylene glycol, glycerol, lactic acid, mixture of hydroxy furans etc.
		Glucaric acid	Glucaro- -lactone, glucaro- -lactone, glucarodilactone, polyhydroxypolyamides, -ketoglucarates etc.
		Sorbitol	Isosorbide, propylene glycol, 1,4-sorbitan, lactic acid, 2,5-anhydrosugars, ethylene glycol, glycerol etc.
		Furan-2,5-dicarboxylic acid	2,5-furandicarbaldehyde, 2,5-dihydroxymethyl furan, 2,5-bis(aminomethyl)-tetrahydrofuran, succinic acid, 2,5-dihydroxymethyl tetrahydrofuran etc.

Table 3 New top 14 building blocks produced from biomass by biorefinery and their evaluated results against criteria²⁴⁾

Compound	Extensive recent literature	Multiple product applicability	Direct substitute	High volume product	Platform potential	Industrial scaleup	Existing commercial product	Primary building block	Commercial biobased product
Ethanol	+++ ^a	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Furfural	+++	++ ^b	+ ^c	++	+	+	+++	++	+++
HMF	+++	++	+	+	++	+	+	++	+
FDCA	+++	+	+	+++	++	+	+	+	+
Glycerol/ derivatives	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Isoprene	+++	++	+++	+++	+	+++	+++	+	+
Bio-hydrocarbons	+++	++	+++	+	+	+	+	++	+
Lactic acid	+++	+++	+	+++	++	+	++	+	+
Succinic acid	+++	+++	+	+	+++	+++	+	+	+
3-HPA	+++	+	+++	+++	++	+	+	+	+
Levulinic acid	+++	++	+++	++	+++	+++	+	+++	+
Sorbitol	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Xylitol	+++	+++	+	+	+++	+	++	+++	++

^aGood performance against criterion; ^bemerging performance against criterion; ^clower performance against criterion.

은 후, 이러한 당류의 생물학적 또는 화학적 전환을 통해 다양한 고부가가치의 중간 바이오화합물(building blocks)을 생산한다. 이 중에서 선정된 12개의 유망한 중간 바이오화합물에는 글리세롤, 3-HPA, 1,4-diacids (숙신산, 푸마르산(fumaric acid), 말산(malic acid)), 3-히드록시부티로락톤(3-hydroxybutyrolactone), 아스파르트산(aspartic acid), 이타콘산(itaconic acid), 레블린산, 글루탐산(glutamic acid), 자일리톨/아라비니톨(arabinitol), 글루카르산(glucaric acid), 소르비톨, FDCA가 있다. 예를 들어, 글리세롤의 경우에는 글리세린산(glyceric acid), 글리시돌(glycidol), 1,3-프로판디올(1,3-propanediol), 프로필렌 글리콜(propylene glycol), 글리세롤 카보네이트, 프로판올(propanol), 디글리세르알데히드(diglyceraldehyde), 모노-, 디-, 또는 트리글리세르산염(mono-, di-, or triglycerate), 가지형 폴리에스테르 및 나일론(branched polyesters and nylons) 등을 유도체로 생산한다.

그리고 2004년에 발표된 12개의 유망한 중간 바이오화합물은 그 후 2010년에 그 동안의 기술발전을 고려하여 9개의 평가기준을 거친 다음 Table 3과 같이 14개로 갱신되었다^{12,24)}. 새롭게 선정된 14개의 유망한 중간 바이오화합물에는 에탄올, 푸르푸랄(furfural), HMF(hydroxymethylfurfural), FDCA, 글리세롤/유도체, 이소프렌(isoprene), 바이오탄화수소(biohydrocarbons), 젖산(lactic acid), 숙신산, 3-HPA, 레블린산, 소르비톨, 자일리톨이 해당된다. 예를 들어, 에탄올의 경우에는 9개 평가기준 모두에 대해서 좋은 평가결과를 보여주었다.

Table 4는 갱신된 14개의 유망한 중간 바이오화합물에 대하여 향후 필요한 기술적 사항을 보여주고 있다²⁴⁾. 예를 들어, 에탄올의 경우에는 선택적 알코올 탈수기술, 바이오매스를 이용한 향상된 생화학적 알코올 생산기술, 그리고 대사공학을 이용한 최적 발효 균주의 개발기술 등이 필요하다.

Table 4 Technology needs for new top 14 building blocks produced from biomass by biorefinery²⁴⁾

Compound	General biorefinery technology needs
Ethanol	<ul style="list-style-type: none"> - Selective alcohol dehydrations - Improved biochemical production of alcohols from biomass (rate, yield, titer, product, pH, inhibitor tolerance) - Engineering of optimal fermentation organisms
Furans (furfural, HMF, and FDCA)	<ul style="list-style-type: none"> - Selective dehydrations of carbohydrates - New catalysts and reaction media for dehydration - Reactive separations - Selective oxidations of alcohols; improved oxidation and dehydration catalysts - Catalytic systems for reactions in aqueous solution
Glycerol and derivatives	<ul style="list-style-type: none"> - Reactions in aqueous solution - Selective reductions and oxidations of polyols - Improved biological conversions of polyols
Biohydrocarbons (isoprene and other biohydrocarbons)	<ul style="list-style-type: none"> - Improved biohydrocarbon production - Engineering of organisms to convert sugars to hydrocarbons - Optimizing rate, yield, titer, product tolerance
Lactic acid	<ul style="list-style-type: none"> - Optimization of bioconversion of carbohydrates - Bioprocesses with high rate, yield, titer, product, pH and inhibitor tolerance - Engineering of organisms to produce single materials
Succinic acid	<ul style="list-style-type: none"> - Bioconversion of carbohydrates - Optimization of yield, rate, titer, separation - Engineering of organisms for optimal production of target
Hydroxypropionic acid/aldehyde	<ul style="list-style-type: none"> - Optimization of bioconversion of carbohydrates - Bioprocesses with high rate, yield, titer, product and inhibitor tolerance - Engineering of organisms to produce single materials - Selective dehydrations of alcohols - Selective reductions of carbonyl groups - New selective hydrogenation catalysts - Chemical processes in aqueous solution
Levulinic acid	<ul style="list-style-type: none"> - Selective dehydrations of carbohydrates - Improved separations of products - Utility of co-product schemes by biorefinery - Improved catalysts for selective carbohydrate conversion processes
Sorbitol	<ul style="list-style-type: none"> - Selective hydrogenolysis of polyols - New catalysts for reduction of carbohydrate derivatives - Selective dehydrations of polyols - Comparative assessment of chemical and biochemical conversion technology - Selective bond breaking/bond making technology for polyols
Xylitol	<ul style="list-style-type: none"> - Selective hydrogenolysis of polyols - New catalysts for reduction of carbohydrate derivatives - Selective dehydrations of polyols - Comparative assessment of chemical and biochemical conversion technology - Selective bond breaking/bond making technology for polyols

4. 바이오리파이너리의 제한점

바이오리파이너리는 무한한 가능성을 가지고 있지만, 아직까지는 초기단계라고 할 수 있다. 따라서 다음과 같은 제한점을 극복해야만 상업화단계로 진입할 수 있다.

첫째, 바이오리파이너리는 미생물 발효공정 및 효소·화학적 전환공정이 주로 사용되기 때문에 무엇보다도 기질로부터 바이오연료 및 바이오화합물을 생산하는 생물학적 및 화학적 전환경로가 최대한 명확히 규명되어야 한다⁸⁾.

둘째, 원료물질인 바이오매스는 원유에 비해 가격

이 저렴하지만, 바이오매스를 바이오연료 및 바이오 화합물 등으로 전환할 때 소요되는 비용은 원유를 이용할 때보다 고가이다. 따라서 전환비용의 감소를 위해 물리적, 화학적, 생물학적 및 열화학적 전환기술의 효율향상 및 최적화를 위한 연구개발이 지속적으로 필요하다. 또한 기존의 오일 리파이너리 시설을 그대로 바이오리파이너리에 이용하는 시설의 호환성이 중요하다. 이렇게 하면 자본집약적인 고가의 시설 비용을 들이지 않을 수 있다¹²⁾. 더불어 부산물의 효과적인 재활용도 비용을 감소시키는데 필요하다.

셋째, 식용 바이오매스를 바이오리파이너리의 원료로 이용하면 식량가격의 상승을 가져오기 때문에, 비식용 바이오매스인 농업폐기물, 산림폐기물, 도시 고형폐기물 등을 효과적으로 이용하는 것이 필요하다²⁵⁾. 다만, 목질계 바이오매스의 전처리 시 여러 가지 물리·화학적 방법들이 복합적으로 사용되는데, 이 과정에서 발효의 저해물질들이 생성될 수 있다. 따라서 발효효율을 최대화하면서 저해물질의 발생을 최소화하는 전처리 과정의 효율향상 및 최적화가 필요하다. 그리고 전처리에서 얻어진 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스의 당화에는 셀룰라아제와 자일라나아제라는 효소가 사용되는데 고율의 효소를 저렴하게 대량생산하는 것과 이를 효율적으로 이용하는 공정 개발이 필요하다¹⁰⁾.

넷째, 대사공학, 시스템 생물공학 및 합성생물학을 이용함으로써 고율 균주의 개발, 균주의 안정성 개선, 핵심 효소의 개량, 배양의 최적화, 전환공정의 수율 향상, 생산물에 대한 미생물의 내성 향상, 그리고 균주에 대한 맞춤형 대량생산 등이 필요하다⁸⁾. 더불어 대사산물의 분리 및 정제가 보다 용이하게 이루어지도록 하는 것도 필요하다¹⁰⁾.

다섯째, 대규모의 중앙집중형 통합 바이오리파이너리 시설은 바이오매스 발생원으로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 수집 및 운반비가 많이 소요된다¹²⁾. 따라서 소규모의 분산형 바이오리파이너리 시설을

발생원 가까이에 설치함으로써 수집 및 운반비를 감소시킬 수 있다.

5. 결 론

우리 사회는 앞으로도 수십 년 간 석유에 의존할 것이다. 그러나 석유의 고갈이 그리 멀지 않았고 석유의 사용으로 인한 지구온난화로 인해서 이에 대한 대비가 필요하기 때문에, 그 대안으로서 바이오리파이너리가 전세계적인 관심을 받고 있다. 하지만 바이오리파이너리의 많은 기술들은 초기 개발단계에 머무르고 있어서 정부의 지속적인 투자와 산학연의 끊임없는 기술개발이 매우 중요하다. 그리고 향후 석유 기반의 산업구조는 바이오매스 기반의 산업구조로 대체될 것이며, 이에 있어서 바이오리파이너리는 핵심적인 역할을 수행할 것이다.

References

1. Ministry of Environment, White paper of environment, Ministry of Environment, Seoul, Republic of Korea, 2016.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (WGI AR5), "Climate Change 2013: The Physical Science Basis", WMO & UNEP, 2013.
3. S.-P. Lee, H. M. Kang and D. W. Park, "Biomass", Korea Institute of Science and Technology Information, Daejeon, Republic of Korea, 2002.
4. J.-H. Jo, "Foreign status and policy implications of biorefinery", Environmental Forum, Vol, 15, No. 6, 2011, pp. 1-8.
5. J.-H. Jo and H.-S. Lee, "A preliminary study for environmentally-friendly application of biofuel using marine biomass", Korea Environment Institute, Seoul, Republic of Korea, 2011.
6. R. Parajuli, T. Dalgaard, U. Jørgensen, A. P. S.

- Adamsen, M. T. Knudsen, M. Birkved and J. K. Schjørring, "Biorefining in the prevailing energy and materials crisis: a review of sustainable pathways for biorefinery value chains and sustainability assessment methodologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 43, 2015, pp. 244-263.
7. C. Sawatdeenarunat, D. Nguyen, K. C. Surendra, S. Shrestha, K. Rajendran, H. Oechsner, L. Xie and S. K. Khanal, "Anaerobic biorefinery: Current status, challenges, and opportunities", *Bioresource technology*, Vol. 215, 2016, 304-313.
 8. J.-M. Park, "Biorefinery", *News & information for chemical engineers*, Vol. 29, No. 3, 2011, pp. 361-365.
 9. K.-H. Lee, "Biomass, alternative resource of the future, and biorefinery", *Fiber Technology and Industry*, Vol. 15, No. 3, 2011, pp. 181-189.
 10. S.-H. Park, "Biorefinery: production of fuels, chemicals, and polymers from biomass", *News & information for chemical engineers*, Vol. 26, No. 1, 2008, pp. 48-56.
 11. S.-H. Kim and K.-H. Kim, "Trends of biorefinery as systems for bioenergy/biochemicals co-products", *Journal of Energy Engineering*, Vol. 22, No. 3, 2013, pp. 250-261.
 12. S. K. Maity, "Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part I", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 43, 2015, pp. 1427-1445.
 13. T. Werpy, G. Petersen, A. Aden, J. Bozell, J. Holladay, J. White, A. Manheim, D. Elliot, L. Lasure, S. Jones, M. Gerber, K. Ibsen, L. Lumberg and S. Kelley, "Top value added chemicals from biomass. Volume 1-Results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas (No. DOE/GO-102004-1992)", Department of energy, Washington DC, USA, 2004.
 14. H.-J. Shin, J.-H. Park, W.-K. Jung, H. Cho, S.-W. Kim, "Development of biorefinery process using microalgae", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 28, No. 2, 2011, pp. 154-167.
 15. B.-M. Sohn, "Produce cutting-edge chemicals from biodiesel byproducts", EBN, <http://www.ebn.co.kr/news/view/363402>, (Search date: 10th October, 2016).
 16. W. Gujer and A. B. Zehnder, "Conversion Process in anaerobic digestion", *Water Science and Technology*, Vol. 15, 1983, pp. 127-167.
 17. R. E. Speece, "Anaerobic biotechnology", 1st ed., Archae press, Tennessee, USA, 1996.
 18. G. Tchobanoglous, H. Theisen and S. Vigil, "Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues", McGraw-Hill Press, Boston, 1993.
 19. S. K. Khanal, "Anaerobic biotechnology for bioenergy production: Principles and Applications", 1st ed., John Wiley & Sons, New York, USA, 2008.
 20. S.-K. Han, D.-H. Kim, H.-S. Shin, "Biohydrogen Production from Organic Waste", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 30, No. 9, 2008, pp. 1-11.
 21. C.-Y. Lee, K.-S. Yoo, S.-K. Han, "Two-stage bioprocesses combining dark H₂ fermentation: organic waste treatment and bioenergy production", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 26, No. 3, 2015, pp. 247-259.
 22. Korea Environment Corp., "Homepage of total information management system for waste energy", <http://www.srf-info.or.kr/srfEnelntro/srfEnelntroR.do>, 2016.
 23. S. K. Maity, "Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part II", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 43, 2015, pp. 1446-1466.
 24. J. J. Bozell and G. R. Petersen, "Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates-the US Department of Energy's "top 10" revisite", *Green Chemistry*, Vol. 12, No. 4, 2010, pp. 539-554.
 25. J. E. Holladay, J. F. White, J. J. Bozell and D. Johnson, "Top Value-Added Chemicals from Biomass. Volume II-Results of Screening for Potential Candidates from Biorefinery Lignin (No. PNNL-16983)", Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, Washington, USA, 2007.