

Biorefinery 산업과 Furfural 생산 및 응용 분야

김승수

강원대학교 삼척캠퍼스 화학공학과
(2016년 1월 2일 접수, 2016년 1월 5일 심사, 2016년 1월 6일 채택)

Production of Furfural and its Application in Biorefinery

Seung-Soo Kim

Department of Chemical Engineering, Kangwon National University, 346 Joongang-ro, Samcheok, Gangwon-do 25913, Korea
(Received January 2, 2016; Revised January 5, 2016; Accepted January 6, 2016)

초 록

에너지 수요의 증가와 화석연료 고갈에 대비해 재생가능한 자원에 대한 관심이 높다. 목질계 바이오매스는 지속 및 재생 가능하며, 원유로부터 생산되는 화학물질을 대체할 수 있고, 바이오 기반의 화학물질과 바이오연료를 생산하는 원료물질로 인식되고 있다. 푸르푸랄은 푸란을 기반으로 하는 메틸푸란, 테트라하이드로푸란, 메틸테트라하이드로푸란, 에틸테트라하이드로푸릴 이써, 에틸 레부리네이트, 레블루닉산과 알칸 등 화학물질 및 용매 생산을 위한 천연 전구체이며, 바이오 화학물질과 바이오연료를 위한 재생 가능한 화학 플랫폼으로 잠재력을 가지고 있다. 본 논문에서는 바이오리파이너리 개념, 푸르푸랄의 생산과 응용분야에 대해 고찰을 하였다.

Abstract

In this new energy economy era, the importance of renewable energy resource needs to be highly addressed, as the demand of energy dramatically increases and fossil fuel is being exhausted. Lignocellulosic biomass is considered as the sustainable and renewable feedstock to produce biochemicals and biofuels that are the alternative for petroleum derived products. Furfural is a natural precursor for the range of furan based chemicals and solvents such as methylfuran, tetrahydrofuran, methyltetrahydrofuran, ethyltetrahydrofuryl ether, ethyl levulinate, levulinic acid, and alkanes. Thus, furfural should be a renewable platform chemical for biochemicals and renewable biofuels. In this paper, the concept of biorefinery, furfural production and its applications are briefly reviewed.

Keywords: renewable resources, biorefinery, biochemical, bioenergy, furfural and furfural derivatives

1. 서 론

바이오매스(Biomass)는 육상 및 해상에 존재하는 생물자원을 총칭하는 의미로 사용되며, 적절한 전환기술을 통해 연료 및 화학물질을 생산할 수 있는 재생가능한 자원이다. 바이오매스는 1세대인 사탕무, 옥수수, 사탕수수, 유채, 대두, 해바라기와 같은 식량계 작물이 있으며, 2세대는 목질계 바이오매스(Lignocellulosic biomass), 그리고 3세대인 미세조류(Micro-algae)와 거대조류(Macro-algae)로 구분할 수 있다. 이런 바이오매스 자원을 물리적·화학적 에너지전환기술을 통해 연료 및 석유화학산업의 원료물질로 전환시킬 수 있다[1].

오일 리파이너리(Oil refinery)에서는 원유를 정제하여 휘발유, 경유와 같은 수송용 연료와 화학산업의 원료물질을 생산해왔다. 바이오리

파이너리(Biorefinery)는 바이오매스로부터 생물학적 또는 화학적 전환공정을 통해 바이오연료(에너지), 전력, 열, 그리고 부가가치가 높은 화학물질 등을 제조하는 개념이다. 바이오리파이너리의 개념은 오늘날 원유(Petroleum)로부터 연료와 석유화학제품을 생산하는 리파이너리와 유사하다. 국제에너지기구(International Energy Agency)의 『바이오에너지 Task 42』에서는 바이오관련 물질 생산(food, feed, chemicals, materials)과 바이오에너지(biofuel, power and/or heat)을 생산하는 지속가능한 공정이라고 정의하고 있다[2,3].

바이오리파이너리 공정으로부터 바이오매스를 원료로 다양한 중간물질과 최종물질을 생산하여 부가가치를 최대화할 수 있다. 예를 들면, 바이오매스를 원료로 소량의 화학물질과 기능성 물질을 추출하여 부가가치를 만들 수 있고, 바이오디젤(Biodiesel)과 바이오에탄올(Bioethanol) 같은 수송용 연료를 대량으로 생산할 수도 있으며, 동시에 전기와 열 에너지를 생산할 수도 있다. 바이오매스를 원료로 할 경우 부가가치가 높은 물질을 생산함으로써 수익성을 높일 수 있고, 연료를 생산으로 에너지 수요를 충족시킬 수 있고, 동력 생산으로부터 에너지 단가를 낮출 수 있다. 그리고 전통적인 발전시설의 온실가스를 줄이는데도 큰 역할을 할 수 있다. 바이오리파이너리 산업이 시작되어 현재 운

Author: Kangwon National University,
Department of Chemical Engineering, 346 Joongang-ro, Samcheok, Gangwon-do 25913, Korea
Tel: +82-33-570-6544 e-mail: sskim2008@kangwon.ac.kr

Table 1. Fossil-derived Product Substitution Options (Cost Price Per GJ end Product)

| | Fossil feedstock cost (£/GJ) | Biomass cost (£/GJ end product) |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Heat | 3 (coal) | 4 |
| Power | 6 (coal) | 22 |
| Transportation fuel | 8 (oil) | 10 |
| Average bulk chemicals | 30 (oil) | 75 |

전되고 있기는 하지만 산업분야가 충분히 활성화되어 있지는 않다. 그러나 미래에는 전통적으로 원유로부터 생산되는 화학물질들을 바이오리파이너리가 대체하는 중요한 역할을 할 것이다.

미국의 NREL (National Renewable Energy Laboratory)은 2개의 다른 플랫폼(Platform)으로 바이오리파이너리 개념을 Figure 1 과 같이 정립하였다[3]. Sugar platform은 바이오매스 원료물질로부터 당을 추출하고, 생화학적 전환공정을 통해 발효에 초점을 맞춘 것이다. Syngas platform은 열화학적 전환공정을 통해 연료, 화학물질, 소재를 생산하는 것에 초점을 맞추고 있다.

Table 1은 Jong과 Jungmeier가 분석한 화석연료와 바이오매스를 대상으로 하여 열, 동력, 수송용 연료 및 벌크 케미칼의 생산비용을 비교한 것이다[4]. 두 가지 원료물질 모두 열 에너지를 생산할 때 가장 부가가치가 낮고, 벌크 케미칼을 생산할 때 부가가치가 높았다.

바이오리파이너리는 역사적으로 식물성 기름, 맥주와 와인의 생산 등을 위한 분리와 전환 기술개발로 이미 오래전부터 우리 생활과 밀접한 연계가 되어있었다. 그러나 현재와 같은 바이오리파이너리 산업은 설탕의 결정화, 감자 전분 생산(19세기 초·중반), 밀과 옥수수 전분 생산(20세기 초반), 대두유, 단백질, 비타민 생산 등으로부터 시작되었다. 몇 가지 예를 들면, 감자 섬유질은 초기에 동물 사료로 이용되었지만, 현재 부가가치가 높은 식품 생산에 사용되고 있다. 감자 전분의 발효로부터 생산된 에탄올은 보드카로 사용되기도 했고, 1950년 대까지 수송용 연료에 25%로 혼합되어 사용되기도 했다[5]. 2차 세계 대전 이후 대두는 단백질 대체식품과 식물성 기름 생산에 활용되었다. 현재 대두는 비타민 E 공급원으로서 다양한 식품생산(margarines, butter, vegetarian burgers), 공산품(oils, soap, cosmetics, inks, clothing) 생산에 활용되고 있으며, 점차 바이오디젤(biodiesel) 생산을 위해 원료 물질로서 비중이 높아지고 있다[4].

앞에서 설명한 예들 이외에 새로운 개념의 바이오리파이너리 분야는 대부분 연구단계에 머물러 있거나, 상용화를 전제로 시범보급을 하고 있는 상황으로 상업화와는 아직까지 거리가 있고, 상업화는 원유가격과 전 세계 경제상황과도 밀접한 연관이 있다. 본 논문에서는 바이오리파이너리에 사용되는 원료인 바이오매스의 종류 및 특성, 기존 리파이너리 산업과의 비교, 바이오매스로부터 유래된 푸르프랄(Furfural)의 생산 및 활용 등에 대해서 살펴보았다.

2. 바이오리파이너리 원료물질

작물 바이오매스(Crop biomass) 중 곡물인 밀(Wheat), 호밀(Rye)과 옥수수(Maize)는 보통 습식제분(Wet milling) 방법으로 전분, 셀룰로스, 오일과 단백질 성분을 분리한다. 건식제분(Dry milling)을 적용할 경우 분말은 물과 효소를 첨가하여 가수분해를 진행한다. 이후 당화와 발효과정을 거치고 농축, 정제와 탈수반응 후 바이오-에탄올

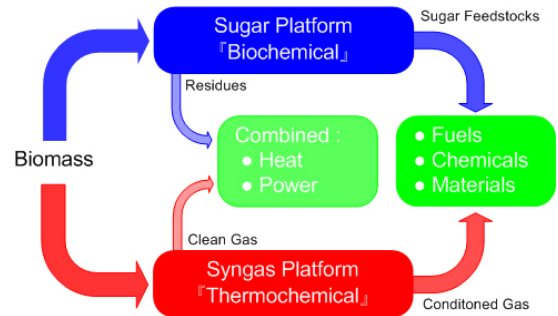


Figure 1. Biorefinery concept.

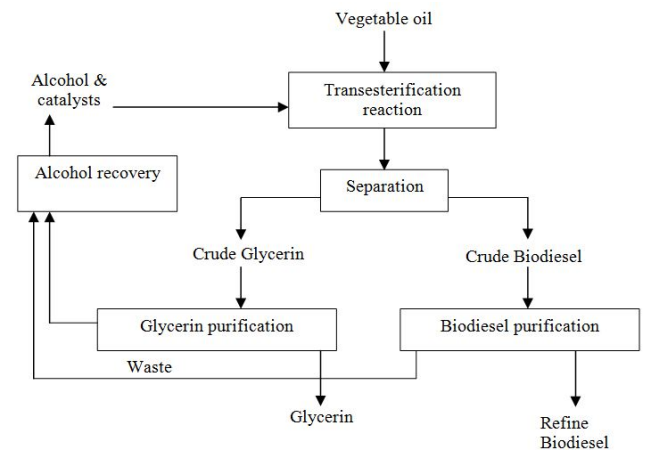


Figure 2. Oil biorefinery using oilseed crops for biodiesel and glycerin.

(Bioethanol)이 생산된다. 이때 잔류물에서 고체성분은 분리를 하고, 건조하여 가축 사료로 이용된다.

식물성오일을 함유한 바이오매스(Oleochemical biomass)는 수송용 연료인 바이오디젤을 생산하는 부가가치가 높은 원료물질로 여겨진다. 곡물의 지방산(Fatty acids), 지방산 에스테르(Fatty esters)와 글리세롤(Glycerol)은 화학산업 기초 원료, 기능성 모노머, 윤활유와 계면활성제 등을 생산하는데 이용된다. 장기적으로 보면, 식물성오일을 함유한 바이오매스는 화석연료를 기반으로한 화학적 리파이너리 산업의 대체할 수 있는 원료물질 공급분야가 될 수 있다. Figure 2는 유지작물을 이용하여 바이오디젤을 생산하는 과정을 나타낸 것이다. 식물성오일은 알콜과 촉매와 함께 트랜스에스테르화반응을 거치고, crude glycerin과 crude biodiesel로 분리된다. 바이오디젤은 정제를 거친 후 경유(Diesel)과 혼합하여 수송용 연료로 활용된다.

목질계 바이오매스(Lignocellulosic biomass)는 셀룰로스(Cellulose), 헤미셀룰로스(Hemicellulose)와 리그닌(Lignin)으로 구성되어 있으며, 미래에 바이오리파이너리와 바이오에너지 산업에서 원료물질을 공급할 수 있는 가장 중요한 자원으로 인식되고 있다. 목질계 바이오매스를 활용하기 위한 전처리과정에서 산(Acid) 또는 알칼리(Alkaline) 약품을 사용하여 구성 성분인 셀룰로스, 헤미셀룰로스와 리그닌 조직을 느슨하게 만들고, 이후 효소 가수분해를 통해 글루코스(Glucose), 만노스(Mannose, C₆), 자일로스(Xylose, C₅) 등으로 전환한다. 오탄당과 육탄당은 주로 바이오연료(ethanol, butanol, hydrogen) 또는 부가가치가 높은 화학물질 생산을 위한 당화공정의 원료물질로 사용된다. 리그닌은 열과 전기생산 등과 폐놀화합물 등의 생산에 사용된다.

목재를 기반으로 한 바이오리파이너리 산업은 펄프, 화학물질과 에

Table 2. Comparison of Refineries and Biorefineries Regarding to Feedstocks, Building Block Composition, Processes, and Chemical Intermediates Produced at Commercial Scale

| | Refinery | Biorefinery |
|---|---|---|
| Feedstock | Feedstock relatively homogeneous Low in oxygen content The weight of the product (mol/mole) generally increases with processing Some sulfur present Sometimes high in sulfur | Feedstock heterogeneous regarding bulk components e.g., carbohydrates, lignin, proteins, oils, extractives, and/or ash Most of the starting material present in polymeric form (cellulose, starch, proteins, lignin) High in oxygen content The weight of the product (mole/mole) generally decreases with processing It is important to perceive the functionality in the starting material Low sulfur content Sometimes high in inorganics, especially silica |
| Building block composition | Main building blocks: Ethylene, propylene, methane, benzene, toluene, xylene isomers. | Main building blocks : Glucose, xylose, fatty acids (e.g., oleic, stearic, sebacic) |
| (Bio)chemical processes | Almost exclusively chemical processes Introduction of heteroatoms (O, N, S) Relative homogeneous processes to arrive to building blocks: Steam cracking, catalytic reforming Wide range of conversion chemistries | Combination of chemical and biotechnological processes Removal of oxygen Relative heterogeneous processes to arrive to building blocks Smaller range of conversion chemistries: Dehydration, hydrogenation, fermentation |
| Chemical intermediates produced at commercial scale | Many | Few but increasing (e.g., ethanol, furfural, biodiesel, mono-ethanoglycol, lactic acid, succinic acid, ...) |

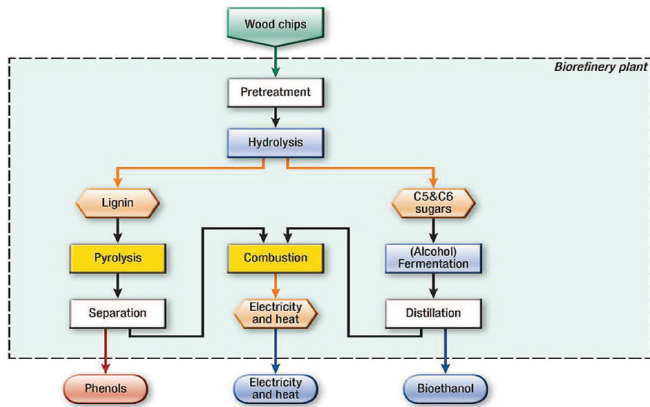


Figure 3. C₃-platform (C₅ and C₆ sugars, electricity and heat, lignin) biorefinery using wood chips for bioethanol, electricity, heat, and phenols.

너지 등과 같이 통합활용 하는 것이 중요하게 대두되고 있다. 목질계는 비식용 자원이라는 장점이 있지만, 종이 신문 발행의 감소로 펄프 산업은 축소되어가고 있다. 따라서 펄프 가공 후 부산물로부터 부가가치가 높은 당과 합성가스 생산을 위한 연구가 집중적으로 진행되고 있다. 리그닌은 목재 가공과정에서 나오는 가장 많은 부산물인데, 이를 이용하여 재생가능한 고분자, 특수 목적의 화학물질과 소재, 고품질의 연료 생산을 위해 활용될 수 있다. 목질계 바이오매스는 파쇄, 건조, 반탄화(Torrefaction) 등의 전처리를 거친 후 고온에서 합성가스(Synthesis gas) 생산에 활용될 수도 있다. 합성가스는 고온에서 세정을 거친 후 촉매 합성 공정으로부터 바이오연료나 화학물질(FT diesel, dimethylether), 바이오에탄올을 포함한 바이오알콜, 다양한 석유화학 원료물질(ethylene, propylene, butadiene) 등을 생산할 수 있다. 아래

Figure 3에는 C₃-platform (C₅ & C₆ sugars, electricity, heat, and lignin) 2세대 바이오리파이너리에 사용되는 우드칩으로 바이오에탄올, 전기, 열 및 페놀 생산에 대한 내용을 나타냈다. 이 공정에서 우드칩은 전처리, 가수분해를 통해 리그닌과 C₅ & C₆ 당으로 분별되고, 리그닌은 열분해 후 페놀을 생산한다. 그리고 C₅ & C₆ 당은 발효를 통해 바이오에탄올을 생산하고, 각각의 공정에서 부산물은 연소과정을 통해 전기와 열을 생산하는 것으로 구성되어 있다.

해조류 바이오매스(Marine biomass)인 미세조류(Micro-algae)와 거대조류(Macro-algae)는 육상의 바이오매스보다 성장속도가 빠르며 생산성이 높은 것으로 알려져 있다. 녹조류(Green algae)는 전분과 오일 함량이 높고, 황조류(Golden algae)는 오일과 탄수화물 함량이 높다. 해조류는 CO₂를 저장하는 능력이 육상의 바이오매스를 능가하기 때문에 온실가스 저감효과가 뛰어난 것으로 인식되고 있다. 또한 바이오연료 생산을 위한 원료물질로서의 잠재력 때문에 해양에서 생산이 연구되고 있다[6].

Table 2는 기존 원유 기반의 리파이너리와 바이오리파이너리의 유사점과 차이점을 정리한 것이다. Figure 4와 Figure 5에는 각각 석유화학산업의 기초물질과 바이오리파이너리 산업의 주요 물질들을 나타냈다. 특히 Figure 4에는 바이오매스로부터 유래된 12가지 핵심 기본요소(Building block)들이 정리되어 있다. 미국의 DOE는 2004년 기준으로 바이오 유래의 12가지 기본요소 발표와 석유화학에서 사용되는 기초물질을 대체하기 위해 바이오리파이너리 기술 개발에 대한 필요성을 논의하였다. Table 2에서 정리된 내용과 Figure 4와 Figure 5를 비교해보았을 때, 원유기반의 석유화학산업과 바이오리파이너리 산업에서의 출발물질, 공정 및 최종 생산품이 상당히 다른 것을 확인할 수 있다.

기존의 석탄, 원유, 천연가스로부터 C₂, C₃, 또는 C₄- 기반 화학 플랫폼을 생산해온 것을 바이오매스로 대체하기 위한 바이오리파이너리

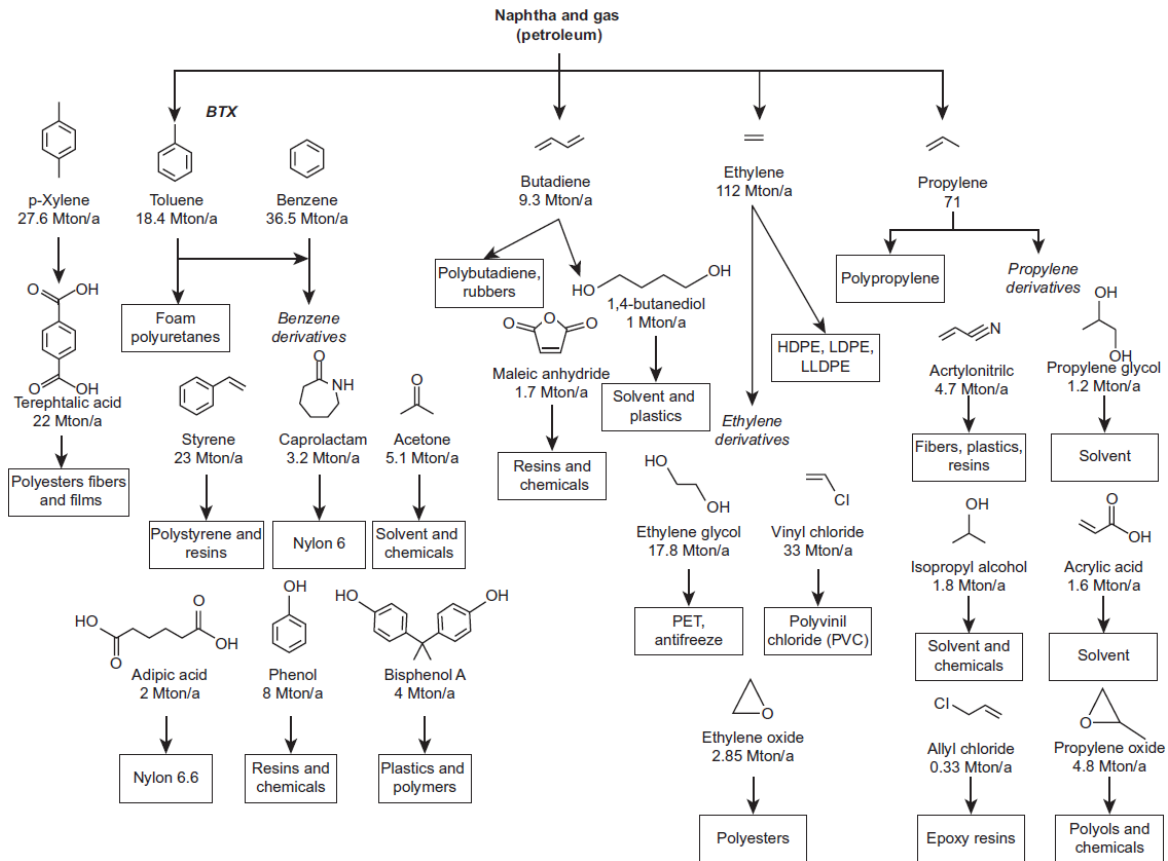


Figure 4. Base petrochemicals, major applications, and global production in 2009[7].

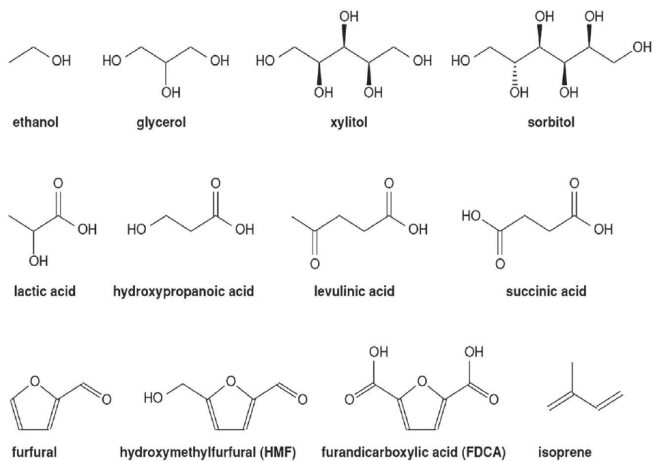


Figure 5. Proposed bio-based platform molecules[8,9].

리 개념이 정립되었는데, 화석연료와 재생 가능한 자원은 서로 대체해서 사용할 수 있으며, 역사적으로 석탄은 원유와 천연가스로 대체되었다. 원유와 천연가스는 원산지에 따라서 조성이 많이 다르다. 셰일 가스(Shale gas) 사용량 증가로 C₂-, C₃-, 또는 C₄- 기본요소 생산량의 비도 변화가 있을 것이며, 바이오유래 C₄- 기본요소(e.g., succinic acid, butanediol)도 새롭게 생산될 것이다.

C₂-Platform 화합물인 바이오에탄올은 글루코스의 발효로 제조되며, 바이오연료로 인식되고 있다. 연료등급의 바이오에탄올은 bioethanol-to-ethylene 공정에서 Al₂O₃/MgO 또는 제올라이트 촉매를 이용하여

탈수에 의해 쉽게 에틸렌으로 전환된다. 바이오에틸렌은 원유, 천연가스, 셰일 가스의 증기분해(Steam cracking)로부터 유래된 C₂ 에틸렌 생성물의 대안으로 활용될 수 있다.

재생가능한 원료물질 생산을 위한 C₃-Platform은 화학적 또는 생화학적으로 접근이 가능하다. 바이오디젤은 수송용 연료로 확고한 기반을 가지고 있고, 글리세롤(Glycerol)은 부산물로서 부가가치가 높은 화학물질을 만들기 위한 핵심 원자재이다. 식물성오일과 동물성 지방의 수소화에 의한 수송용 연료를 생산하고 부산물로 프로판이 생산된다. 글리세롤의 탈수로 아크롤레인(Acrolein), 바이오프로필렌과 바이오프로판이 생산될 수 있다. 바이오매스는 고온에서 가스화로부터 합성가스 생산과 이 합성가스를 이용하여 바이오메탄올, methanol-to-olefins, 프로필렌 등을 생산할 수 있다. 그리고 당의 발효로부터 바이오에탄올 생산과 이를 탈수하여 바이오에틸렌, 에틸렌의 이성화로부터 부텐을 생산할 수 있다. 글루코스의 직접 전환으로 프로필렌을 생산하고, 이를 활용하여 바이오이소부텐(Bio-isobutene) 생산에 이용할 수 있다. 다른 중요한 C₃ 기본요소는 젖산(Lactic acid)이며, 이것은 탄수화물의 발효 또는 글리세롤의 화학적 전환을 통해 생산될 수 있다. 젖산의 에스테르화, 탈수, 산화, 수소화 등에 의해 lactide, lactates, acrylic acid, pyruvic acid, 1,2-propanediol 등의 다양한 화합물 원료가 될 수 있다.

C₄-Platform으로 옥수수 또는 사탕수수 찌꺼기를 원료물질로 사용하여 발효과정을 통해 아세톤-부탄올(acetone-butanol) 또는 아세톤-부탄올-에탄올(acetone-butanol-ethanol)을 생산할 수 있다. 최근 미생물 발효로 글루코스로부터 부가가치가 높은 1-butanol, 2-methyl-1-butanol

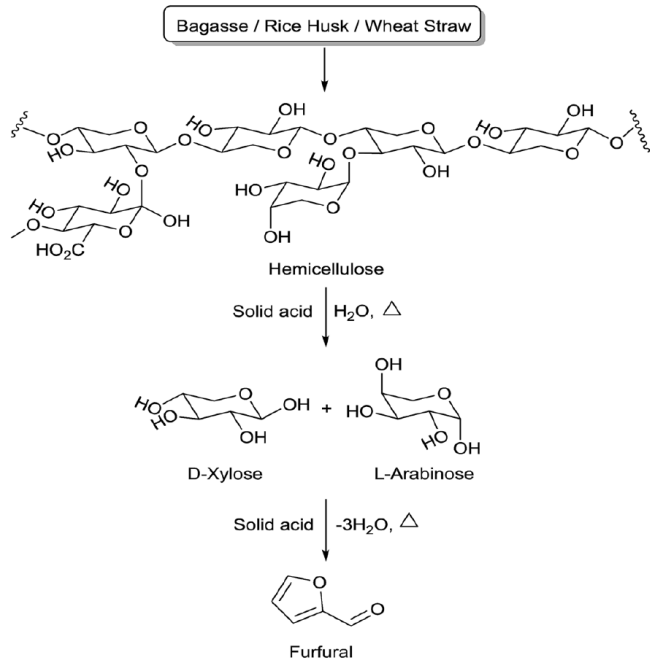


Figure 6. One-Pot conversion of hemicellulose to furfural, using a solid catalyst[11].

과 isobutanol을 생산하는 기술이 개발되고 있다. 산 촉매를 이용한 탈수로 isobutanol은 C₄ 올레핀 혼합물(1-butene, cis-2-butene, trans-2-butene, and isobutene)으로 전환시킬 수 있다. 탄수화물을 기반으로한 C₄ 기본요소들은 원유의 분해로부터 생산되는 C₄ 중간체의 대체물질뿐만 아니라 C₄ 기반의 새로운 고분자물질을 생산하는 보완제이다. 이런 대표적인 경우가 숙신산(succinic acid: butanedioic acid)이다. 숙신산의 실제 산업적 생산은 무수말레인산(maleic anhydride)의 수소화와 탈수로 만들어지며, 부가가치가 높은 주요 생산품은 1,4 butanediol로 전환하는 것이다.

3. Furfural 특성 및 응용분야

푸르푸랄(Furfural)은 사탕수수 부산물, 옥수수 속대, 귀리, 밀겨, 톱밥과 같은 다양한 농업부산물로부터 얻어지는 유기화합물이다. 푸르푸랄은 대부분의 극성 용매에 잘 용해되지만, 물 또는 알칸에는 약간만 용해되며, 수소화반응으로 쉽게 테트라하이드로푸란(Tetrahydrofuran) 유도체가 된다. 식물들은 대부분 5탄당인 다당류 헤미셀룰로오스를 함유하고 있다. 산업적으로 생산되는 푸르푸랄은 목질계 바이오매스 원료물질의 온도를 153 °C에서 240 °C까지 올리고, 산 촉매에 의한 가수분해와 펜토산(Pentosan)의 탈수가 일어나면서 생성된다(Figure 6). 펜토산은 바이오매스의 구성 성분인 헤미셀룰로오스 부분에 포함되어있다.

Figure 6에서 펜토산은 5탄당 다당류이며, 3몰의 물분자를 잃으면서 다음과 같은 같이 푸르푸랄이 생성된다.



푸르푸랄이 만들어지는 과정은 다양한 모델이 제안되고 있지만, 아직까지 정확한 반응 메커니즘은 알려져 있지 않다. Nimlosd와 동료들

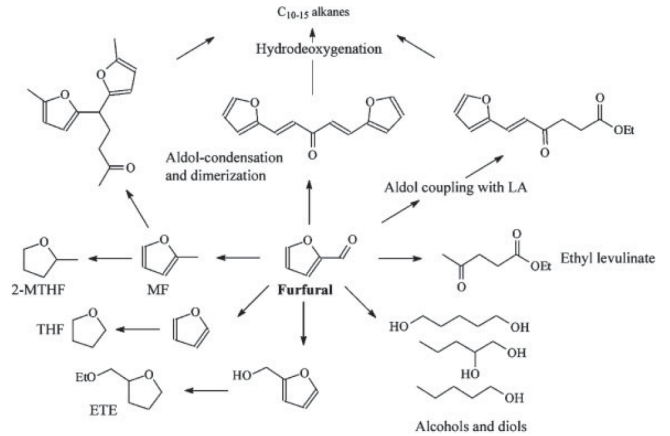


Figure 7. Proposed biobased platform molecules[10,12]. MF : methylfuran, LA : levulinic acid, MTHF : methyltetrahydrofuran, THF : tetrahydrofuran, ETE : ethyltetrahydrofurfuryl ether.

은 열역학 계산을 통해서 O₂로 양성자화된 피라노스(Pyronose) 고리가 dehydrofuranose 중간체가 되고, 이것의 탈수에 의해 푸르푸랄이 된다고 제안하였다[10]. Marcotullio와 de Jong은 할라이드염 존재 하에서 나일로즈로부터 1,2-enediol 중간체에 의해 푸르푸랄이 생성된다고 제안하였다[4,10].

푸르푸랄은 비석유계의 재생가능한 화학원료물질이다. 푸르푸랄의 수소화반응으로 푸르푸릴알콜(Furfuryl alcohol : FA)이 제조되는데, 이것은 화학물질 합성을 위한 화학 중간체로 사용되며, 다시 수소화반응을 시키면 테트라하이드로푸릴알콜(Tetrahydrofuryl alcohol: THFA)이 된다(Figure 7). 푸르푸랄은 산화반응에 의해 다른 푸란계 화합물인 퓨로산(Furoic acid)를 제조하는데도 사용되고, 자체가 또한 중요한 화학용매이다.

푸르푸랄은 에탄올, 에테르(Ether)와 물에도 용해되기 때문에 일반적으로 용매로도 활용이 가능하다. 푸르푸랄과 아세톤의 수소화에 의한 알돌 축합반응(Aldol condensation)으로 높은 수율의 액상 알칸(Alkane) 화합물을 만들 수 있고, 이것은 수송용 연료로 활용이 가능하다. 푸르푸랄과 그 유도체들은 항공용 연료에 해당하는 범위의 알칸을 만들 수 있으며, 이것은 수송용 연료인 가솔린과 혼합해서 사용할 수 있다. 푸르푸릴 알콜(Furfuryl alcohol)은 자동 점화성 유체의 한 종류로 우주선의 액체로켓 연료를 자발적으로 점화시키는데 사용되며, 산소가 없는 우주에서 점화유체로 사용된다. Methyl levulinate (LA)는 화장품 중간원료, 방부제와 바이오연료로 직접 활용이 가능하다. LA는 푸르푸랄과 중합하여 탈수반응 후 경유(Diesel)에 해당하는 연료를 얻을 수 있다. MTHF는 연료로서의 활용가능성이 연구되었는데, 푸르푸랄을 수소화하여 MF를 만들고, 연속해서 Ni 기반의 촉매상에서 고리수소화반응을 유도하여 제조한다[12].

4. 결 론

식물자원인 바이오매스를 이용한 바이오리파이너리는 반응기술, 촉매기술 및 분리·정제기술의 중요성이 매우 높아 화학공학분야에 종사하는 연구자들에게 새로운 도전분야이다. 기존 원유를 기반으로 한 오일 리파이너리 이후를 대비한 기술개발과 이용에 적극적인 노력이 필요하다. 앞으로 바이오리파이너리를 통해 생산된 바이오화학제품들이 시장에 성공적으로 도입되기 위해서는 식량자원이 아닌 바이오매

스의 확보, 각종 전환기술로 생산된 중간체의 업그레이드 기술의 개발, 시장도입을 위해 기술경쟁력 확보에 대한 적극적인 노력이 필요한 시점이라 판단된다.

References

1. S.-S. Kim and D. J. Suh, Thermochemical platform: Production of bio-oil using pyrolysis, *News & Information for Chemical Engineering*, **32**(2), 370-377 (2014).
2. Biorefinery Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Biorefinery>.
3. What IS a Biorefinery? Available at: <http://www.nrel.gov/biomass/biorefinery.html>.
4. E. de Jong and G. Jungmeier, Biorefinery concepts in comparison to petrochemical refineries, *Industrial Biorefineries and White Biotechnology* (2015).
5. E. Dinjus, U. Arnold, N. Dahmen, R. Höfer, and W. Wach, Green fuels - sustainable solutions for transportation. In: R. Höfer, editor. *Sustainable solutions for modern economies*, Cambridge: RSC Green Chem. No 4, RSC Publ., 125-163 (2009).
6. Aquatic Biomass Research Center Available at: <http://abrc.re.kr/>.
7. A. C. Kokossis and A. Yang, On the use of systems technologies: a systematic approach for the synthesis and design of future biorefineries, *Comput. Chem. Eng.*, **34**(9), 1397-1405 (2010).
8. T. Werpy and G. Petersen, *Top value added chemicals from biomass, volume 1 results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas*, U.S. Department of Energy (2004).
9. 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" revisited, *Green Chem.*, **12**, 539-554 (2010).
10. C. M. Cai, T. Zhang, R. Kumar, and C. E. Wyman, Integrated furfural production as a renewable fuel and chemical platform from lignocellulosic biomass, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **89**, 2-10 (2014).
11. E. E. Anthonia and S. H. Philip, An overview of the applications of furfural and its derivatives, *Int. J. Adv. Chem.*, **3**, 32-47 (2015).
12. J.-P. Lange, E. van der Heide, J. van Buijtenen, and R. Price, Furfural-A Promising Platform for Lignocellulosic Biofuels, *Chem. Sus. Chem.*, **5**, 150-166 (2012).