

재생 및 지속사용 가능 자원 유래 탄소 중립형 접착소재

김백진¹ · 김상용¹ · 조진구^{1†} · 이상협² · 김현중³

¹한국생산기술연구원 청정생산시스템연구본부 그린공정연구부, ²대구가톨릭대학교 자연대학 생명화학과,

³서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부 환경재료과학전공

바이오복합재료 및 접착과학 연구실, 바이오매스 기반 바이오소재 연구팀

(2010년 2월 5일 접수)

Renewable and Sustainable Resource Derived Carbon Neutral Adhesive Materials

Baekjin Kim¹, Sangyong Kim¹, Jin Ku Cho^{1†}, Sang-Hyeup Lee², and Hyun-Joong Kim³

¹Green Chemistry & Manufacturing System Division, Green Process R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan 331-825, Korea

²Department of Life Chemistry, Catholic University of Daegu, Kyungsan 712-702, Korea

³Lab. of Adhesion & Bio-Composites, Program in Environmental Materials, Research Team for Biomass-based Bio-Materials, Research Institute and for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

(Received February 5, 2010)

요약: 지난 세기 동안 무분별한 화석자원의 남용과 중국 등 개발도상국에서의 수요급증은 불안정한 유가문제를 야기하였고, 막대한 양의 비가역적 이산화탄소 배출은 지구온난화 문제를 발생시켰다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 석유자원을 대체할 수 있는 재생 및 지속사용 가능 자원에 대한 관심이 커지고 있다. 본 논문에서는 재생 및 지속사용 가능 자원으로서 식물성 바이오매스 공급원을 활용하여 석유화학제품 대체하고자 하는 연구개발 동향을 접착소재의 관점에서 고찰하였다.

Abstract: The extensive use of fossil resources over the past century resulted in dwindling supply and surging price of oil and it is strongly suspected that irreversible global climate change might be due to carbon dioxide emitted from combustion of fossil carbons. With this regard, much attention is recently paid to renewable and sustainable resources as alternatives to petroleum. In this review, we considered a range of efforts to replace petroleum-derived chemicals, particularly adhesive materials with renewable and sustainable plant-based biomass feedstock.

Keywords: renewable and sustainable resources, biomass, carbon neutral, alternatives, adhesives

1. 서 론

석유자원의 고갈에 따른 원유가의 불안정과 비가역적 온실가스 배출에 의한 지구온난화 문제를 해결하기 위해 기존의 석유기반 화학산업을 자원순환형 지속가능 산업으로 전환하는 패러다임의 변화가 이루어지고 있다 [1,2]. 다시 말해, 지금까지 비가역적으로 사용하고 있던 석유, 석탄 등 탄소자원을 재생 및 지속사용이 가능한 (renewable and sustainable) 탄소자원으로 대체하고자 하는 노력이 활발히 진행되고 있으며, 새로운 인증제도

(ASTM D 6866) 및 세금제도(탄소세)를 마련하여 비가역 탄소자원의 사용을 엄격히 관리하기 시작했다. 현재 석유는 전체 생산량의 65%를 연료로서 사용하고, 35%를 수 만종에 이르는 다양한 화합물을 제조하기 위한 원료로 전환하여 사용하고 있다. 현재 인류가 사용하고 있는 대부분의 화학소재는 석유로부터 유래된다고 해도 과언이 아니다. 이러한 석유 중심의 화학소재 산업을 대체하기 위한 많은 연구가 진행 중에 있으며, 이 중 가장 대표적인 것이 식물성 바이오매스의 활용이다. 이는 석유자원과는 달리 식물성 바이오매스로부터 유래된 연료 및 원료물질은 사용 후 광합성 작용을 통해 자원의 재생화가 가능하기 때문이다(Figure 1).

[†]Corresponding author: Jin Ku Cho (jkcho@kitech.re.kr)

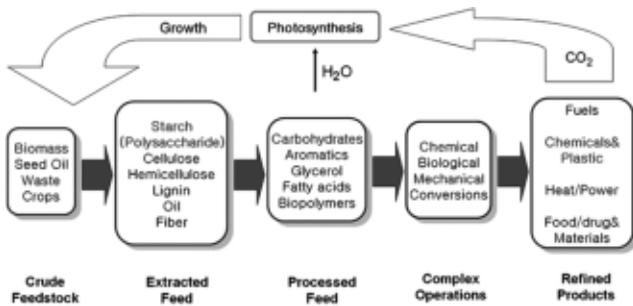


Figure 1. Carbon cycle by renewable and sustainable biomass resources.

광합성 작용을 통해 매년 새롭게 생산되는 탄소자원은 약 1,700억톤에 이르며, 현재 활용하고 있는 양은 이중 약 3~4% 정도에 불과하기 때문에 식물성 바이오매스로부터 유래된 화학물질은 석유로부터 유래된 화학물질을 상당량 대체할 수 있을 것으로 기대하고 있다[3-5]. 이미 미국, 유럽 등 선진국을 중심으로 이와 관련한 괄목할만한 개발이 이루어지고 있는데[6-9], 그 대표적인 것이 듀폰사에서 개발된 1,3-PDO (propane diol)이다[10,11]. 1,3-PDO는 식물로부터 유래된 글루코오스로부터 발효공정을 통해 얻어지는 물질로서 폴리에스터의 단량체로 사용될 때 기존의 폴리에스터와는 차별적인 물성을 나타내어 현재 시장에서 큰 호응을 보이고 있다. 또한 PET 용기의 단량체로 사용되는 TPA (Terephthalic acid)도 바이오매스로부터 유래된 물질로 대체하려는 시도가 이루어지고 있는데, 시장의 규모 상 상당한 파급효과가 있을 것으로 예상된다.

같은 맥락에서 동 시대 산업 전 분야에 깊숙이 연관되어 있는 접착제 산업도 기존의 비가역적 밸류체인을 순환형 구조로 재편될 것을 요구 받고 있다. 최근 Bath 대학의 Packahm 교수는 접착제 분야에서도 이러한 지속사용 가능성(sustainability)이 앞으로 중요한 의미를 가질 것으로 분석하였다[12]. 접착제는 일반 가정에서부터 첨단 산업분야까지 그 적용범위가 광범위한 화학소재로서 다양한 화학물질의 혼합물 형태로 제조되어 사용되고 있다. 이러한 접착제 내의 각각의 화학물질들은 여타 다른 화학물질과 마찬가지로 거의 대부분이 석유로부터 유래된 석유화학물질로서 이를 재생자원 유래 물질로 전환하려는 노력이 이루어지고 있다. 본 총설에서는 최근에 개발된 대표적인 식물성 바이오매스 유래 접착소재를 화학적 구성성분별로 나누어 소개하고, 이를 통하여 향후 개발 방향과 가능성에 대해 살펴보고자 한다.

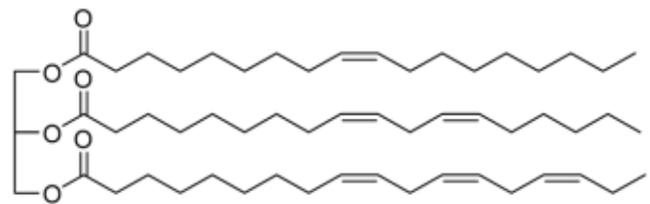


Figure 2. Representative chemical structure of triglyceride.

2. 본 론

2.1. 유지계 바이오매스 유래 폴리올을 이용한 폴리우레탄 접착소재

식물성 유지계 바이오매스로부터 얻어지는 식물성 오일, 지방산과 그 유도체는 기존의 석유로부터 나오는 핵심 원료물질을 대체하여 정밀화학제품, 고분자, 단량체 등을 제조할 수 있는 잠재력이 매우 큰 재생자원으로 인식되어 왔다[13]. 식물성 유지계 바이오매스로부터 나오는 지방은 트리글리세라이드(triglyceride)라는 물질로서 화학적으로 글리세린과 3개 지방산이 에스테르 결합으로 연결되어 있는 구조를 가지고 있다(Figure 2).

식물성 유지계 바이오매스로는 팜(Palm), 대두(Soybean), 유채(Canola), 평지씨(Rapeseed), 아마씨(Linseed), 목화씨(Cottonseed), 코코넛, 해바라기, 올리브, 자트로파(Jatropha), 아주까리(castor bean) 등이 있으며, 바이오매스 공급원 으로부터 추출된 트리글리세라이드는 화학적인 변형을 통해 다수의 히드록시 관능기를 갖는 고분자 단량체로 전환될 수 있다. 일반적으로 화학적 변형을 통한 히드록시 관능기의 도입이 가능한 반응 자리로는 에스테르 결합 지점과 지방산 내의 이중결합 지점이 있으나, 아주까리기름처럼 지방산 내에 이미 히드록시 관능기가 존재하는 경우도 있다. 지방산 내의 이중결합을 이용한 관능기의 도입은 주로 에폭시화 반응을 통해서 이루어진다. 식물성 오일의 에폭시 화합물은 그 자체로도 PVC 가소제 용도로 연간 약 20만톤 규모의 시장을 형성하고 있지만[14], 최근에는 폴리우레탄의 단량체인 폴리올을 생산하기 위한 전구체로서 활용도를 넓혀가고 있다. 식물성 오일 유래 폴리올을 제조하는 가장 손쉬운 방법으로는 이중결합을 직접 산화시키는 것이지만 반응의 제어가 용이하지 못하여 히드록시 관능기뿐만 아니라 퍼옥사이드, 알데히드, 케톤과 같은 다른 형태의 산화물이 함께 생성되기 때문에 히드록시 관능기의 수가 부족하고, 추가의 분리정제공정이 요구되는 단점이 있다. 그러나 이러한 직접 산화공정에 의해서도 히드록시 관능기의 양을 증가시킬 수 있는 기술이 개발되기도 하였다[15]. 식물성 오일 내의 이중결합 위치에 히드록시 관능기를 보다 제어가 용이하게 도입하기 위한 방법으로는 에폭시화 반응을 통한 에폭시 화합물을 1차적으

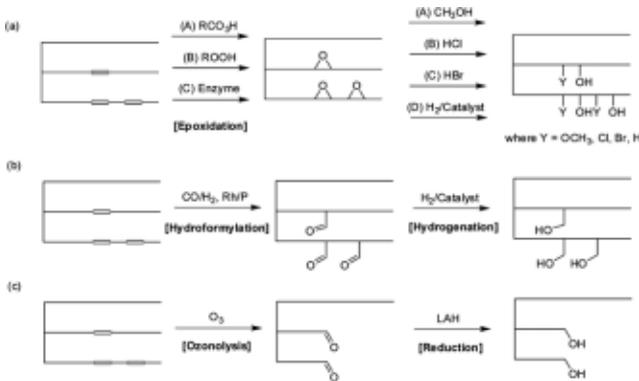


Figure 3. Preparation of polyols from vegetable oil-derived triglyceride via (a) epoxidation, (b) hydroformylation, and (c) ozonolysis.

로 제조한 후[16-18], 에폭시 고리를 알코올, 무기산, 수소화 반응을 통해 개환하여 폴리올을 제조하는 방법이 주로 사용되고 있다(Figure 3(a))[19-21]. 이 방법은 각 단계에서의 수득률이 우수하고, 제조비용도 저렴하며, 많은 연구개발을 통해 조건의 최적화가 이루어져 가장 널리 사용되고 있는 식물성 오일 유래 폴리올의 제조법이다. 이 밖의 폴리올 제조 방법으로는 하이드로포밀화-수소화 반응을 통해 이중결합 위치에 히드록시 메틸기를 도입하는 방법이 있으나, 로듐과 같은 값 비싼 금속촉매를 사용하여야 하기 때문에 코발트와 같은 저가의 금속촉매를 활용하거나, 하이드로포밀화와 수소화 반응을 동시에 수행하는 공정에 대한 연구가 진행되기도 하였다[22,23] (Figure 3(b)). 또한 오존분해반응을 통해 이중결합을 분해하고 말단에 1급 알코올을 도입하거나 [24] (Figure 3(c)), 트리글리세라이드와 폴리올의 에스테르전이반응을 통해 히드록시 관능기가 배가된 폴리올을 제조하는 방법 등이 있다[25].

식물성 오일로부터 제조된 폴리올을 단량체로 사용하여 이소시아네이트와의 반응을 통해 얻어지는 폴리우레탄은 기본적으로 가교화된 네트워크 구조의 고분자를 이룬다. 따라서, 이렇게 제조된 폴리우레탄은 가교도와 화학적 조성에 의해 다양한 물성을 구현할 수 있다. 에폭시화 전구체를 통해 얻어진 폴리올로부터 제조된 폴리우레탄의 경우 네트워크 구조를 이루며 비교적 높은 유리전이온도(T_g)를 나타낸다[26]. 또한 제조된 폴리우레탄 수지의 밀도는 사용된 폴리올에 의해 영향을 받는데, 브롬화 폴리올을 사용한 폴리우레탄의 경우 1.26 g/cm^3 로 가장 높은 밀도를 보이며, 염소화 폴리올을 사용한 경우는 1.15 g/cm^3 , 메톡시화 폴리올을 사용한 경우는 1.11 g/cm^3 를 나타낸다. 마찬가지로 T_g 도, 인장강도, 신장강도도 사용된 폴리올에 의해 영향을 받아, 할로겐화된 폴리올을 사용하여 제조된 폴리우레탄의 경우 수소화반응에 의해 얻어진 폴리

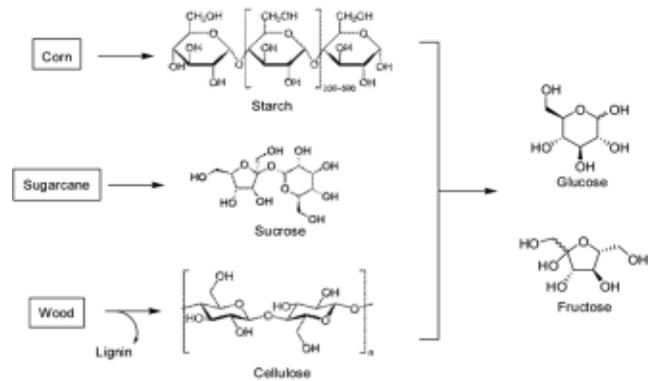


Figure 4. Value chain of hexoses (glucose and fructose) from plant-based biomass feedstock.

올을 사용하여 제조된 폴리우레탄보다 높은 값을 나타낸다. 최근 Dow Chemical사에서는 RENUVA™라는 자체 기술로 개발된 폴리올을 대두유로부터 생산하여 폴리우레탄 접착소재 제조에 적용하고 있으며, 기존의 석유화학기반 폴리에스테르로부터 생산된 폴리올보다 우수한 물성을 보이며, 건축, 자동차, 포장재, 신발, 가구 등에 성공적으로 응용하고 있어, 앞으로 관련 접착제 시장에 상당한 영향력을 미칠 것으로 예상된다.

2.2. 목질계 바이오매스 유래 접착소재

지구상에 존재하는 식물성 바이오매스 중에 가장 많은 양이 존재하고 있으며, 석유 유래 화합물을 대체하기 위한 탄소원으로 가장 활발한 연구가 진행 중인 것이 탄수화물 자원이다. 탄수화물은 $(\text{CH}_2\text{O})_n$ 의 화학식을 갖는 물질로서 일반적으로 단당화과정을 통해 6탄당 물질인 글루코오스나 프룩토오스로 분해되며, 이를 출발물질로 하여 발효공정 또는 촉매공정을 통해 유용한 화합물로 전환된다(Figure 4). 지금까지 이러한 탄수화물은 주로 옥수수로부터 얻어지는 전분이나 사탕수수로 부터 얻어지는 당분을 주요 공급원으로 사용하였다. 이는 전통적으로 가장 손쉽고 저렴하게 6탄당을 얻는 방법으로 알려져 왔으며, 관련된 효소나 공정기술이 잘 정립되어 있기 때문이다. 그러나 이러한 작물계 바이오매스 공급원의 사용은 식량자원을 이용하거나 경작지를 공유하는 문제로 인해 또 다른 문제를 야기하였고, 이로 인해 최근에는 작물계 바이오매스 대신 자연적으로 성장하며, 기존의 경작지를 사용할 필요가 없는 목질계 바이오매스에 대한 관심이 증가하고 있다. 목질계 바이오매스는 작물계와는 달리 리그닌이라는 방향족계 구성성분이 다량 존재하여 전처리를 통한 분리가 요구되고, 탄수화물인 셀룰로오스가 전분 또는 당분과 달리 화학적으로 안정하며, 생물학적인 당화과정이 까다로워 손쉽게 활용하는데 해결해야 할 점이 많았다. 그러나 최근 셀룰로오스를 글루코오스로 단당

화하는 효소가 개발되어 비교적 저렴하게 출발물질인 글루코오스를 확보할 수 있는 길이 열렸으며, 셀룰로오스를 직접 유용한 물질로 전환하고자 하는 연구도 활발히 진행 중에 있다.

2.2.1. 셀룰로오스 유래 푸란계 물질을 이용한 접착소재

목질계 바이오매스를 혐기성 조건하에서 전처리하여 리그닌을 분리한 후 약산 조건하에서 5탄당으로 이루어진 당류 고분자인 헤미셀룰로오스를 녹여내면, 셀룰로오스를 얻을 수 있다. 셀룰로오스는 6탄당인 글루코오스의 C1과 C4 탄소가 β-결합으로 연결된 선형 고분자 물질로서 분자 사이(inter-molecular) 또는 분자 내(intra-molecular)의 수소결합으로 인해 안정한 결정성 구조를 가지고 있으며, 물을 비롯한 범용 용매 조건하에서 용해도가 매우 낮다. 더욱이 cellulase라는 효소가 개발되기 전까지는 효율적으로 단당화하는 방법도 많은 어려움이 있었다. 그러나, 유전공학적인 기법으로 효율성이 우수한 효소가 개발되고, 생물공학의 발전으로 발효공정 비용이 절감되었고, 고유가에 따른 석유 유래 원료의 가격 상승으로 셀룰로오스 유래 글루코오스의 생산 경쟁력이 강화되고 있다. 셀룰로오스로부터 단당화 단계를 거쳐 생성되는 글루코오스는 다양한 경로를 통해 유용한 화합물로의 전환이 가능하며, 석유화학공정으로부터 나오는 각종 화합물들을 대체할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 글루코오스를 전환하는 방법으로는 생물학적인 발효공정 또는 화학적인 촉매공정이 모두 가능하다. 이 중 카르복실산 또는 히드록시 관능기를 가진 고분자 단량체 물질로는 숙신산(succinic acid)[27], 락틱산(lactic acid)[28], 이타콘산(itaconic acid)[29-31], 글루타민산(glutamic acid)[32-34] 등이 있다. 이러한 물질들은 연속적인 산화/환원 촉매공정을 통해 추가의 전환이 이루어지기도 한다. 예를 들어 숙신산의 경우 수소화반응을 통해 1,4-BDO (1,4-butane diol)로 환원되어 폴리에스테르의 단량체로 사용할 수 있다(Figure 5).

이와 함께 글루코오스 또는 프룩토오스의 탈수반응에 의해서 얻어지는 물질로서 푸란계 화합물이 있는데, 이 물질은 산 혹은 유기금속 촉매 하에서 당화합물 1 몰당 3당량의 물이 탈수되어 생성되며, 대표적인 물질이 5-히드록시메틸-2-푸르푸랄(HMF)이다. HMF는 이후 수소화반응, 산화 및 환원 반응들을 거쳐 연료 첨가제, 의약품 중간체 등의 정밀화학제품으로 전환이 가능하고, 또한 폴리에스테르, 폴리우레탄, 폴리아미드 등의 고분자 소재의 합성에도 응용이 가능하다(Figure 6).

특히 이러한 푸란계 화합물은 기존의 석유화학계 유래에 방향족 물질과 유사한 물성을 나타내어 탈석유화학계 방향족 화합물 대체 친환경 소재로서 기대를 모으고 있으며[35], 접착소재로서의 물성도 기존 방향족

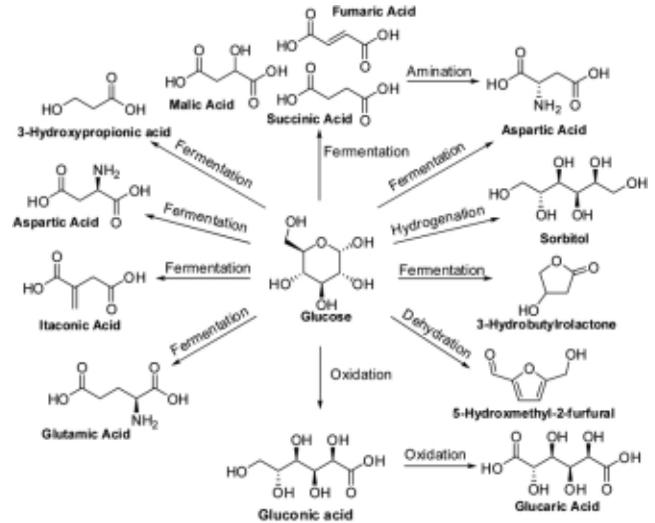


Figure 5. Summary of transformation of glucose into top value-added chemicals.

계 소재와 유사하여 대체가 가능하다는 연구결과도 이미 보고된 바 있다[36]. 푸란계 화합물의 전환반응은 프룩토오스와 같이 5각 고리 구조를 갖는 6탄당의 경우 산 조건하에 쉽게 생성되지만[37], 글루코오스와 같이 6각 고리 구조를 갖는 6탄당의 경우는 전환반응 중에 이성질체화 반응이 진행되어야 하기 때문에 그 동안 효율적으로 전환되는 방법이 없었다. 공급자원의 규모적 관점에서 프룩토오스는 일부 작물에서만 얻을 수 있기 때문에 글루코오스로부터 푸란계 화합물을 얻을 수 있는 효과적인 전환방법의 개발은 그 동안 최대의 이슈로 여겨져 왔다. 그러던 중 이미다졸륨 이온성 액체 상에서 크롬 금속촉매를 사용하여 80%의 수득률로 HMF를 생성하는 조건이 개발되었고[38], 최근에는 셀룰로오스로부터 직접 HMF를 얻는 기술도 개발되어 푸란계 화합물을 다양한 용도로 응용하고자 하는 연구들이 활발히 진행되고 있다[39,40]. 이와 관련하여 최근 미국의 Battelle 연구소에서 푸란계 화합물을 우수한 항부식성과 난연성을 갖는 접착/코팅소재를 개발하는데 성공하였다(Figure 7)[41].

2.2.2. 리그닌 유래 PDC를 이용한 폴리에스테르 접착소재

리그닌은 가장 풍부하게 존재하는 방향족계 바이오매스이다. 광합성을 통해 많은 양의 리그닌이 나무에서 생성되며, 전체 나무질량(수분 제외)의 15~36%를 차지한다. 그러나 리그닌은 매우 복잡하고 불규칙적인 3차원 화학구조를 가지고 있다(Figure 8). 이것은 식물 세포 내에서 모노리그놀이 불규칙적으로 중합되어 형성되기 때문이다. 따라서 아직까지 바이오매스로서 리그닌을 활용할 수 있는 시스템이 정립되지 못하고 있다.

더욱이 염기산화와 같은 화학적 처리를 통해 고분자

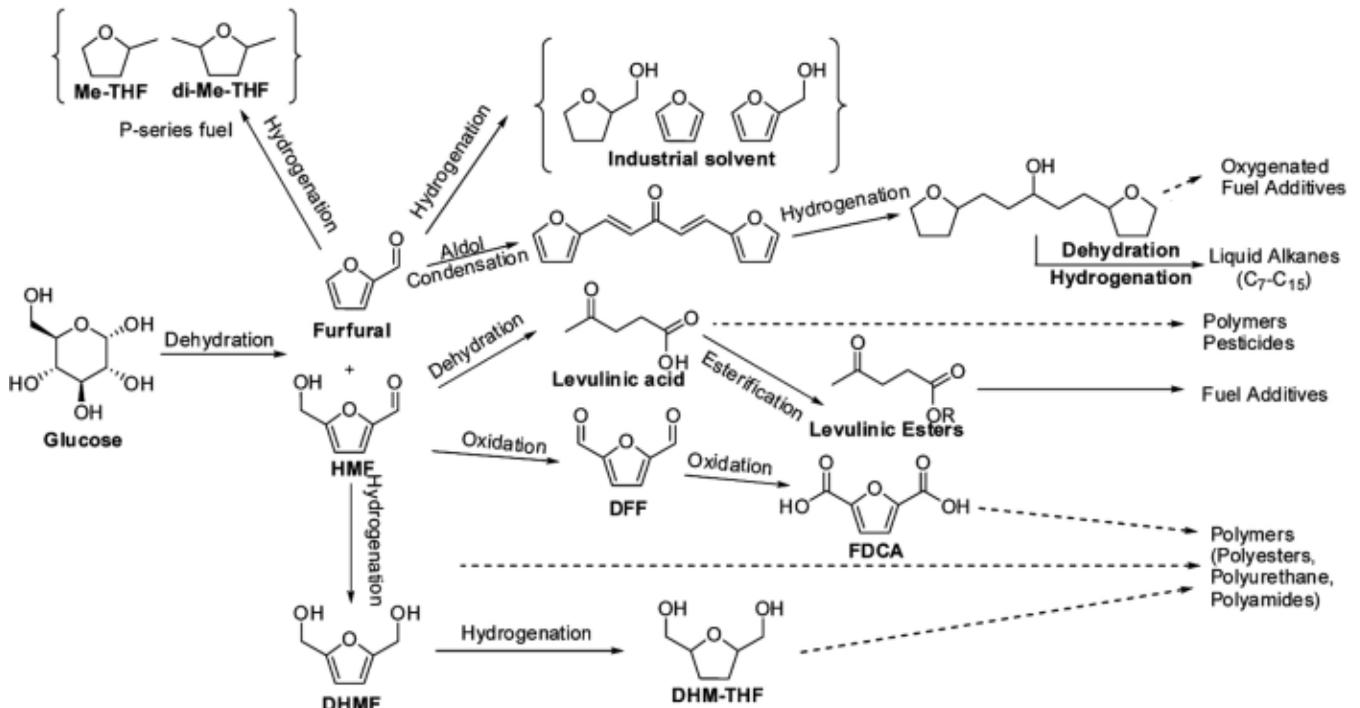


Figure 6. Chemical transformation of glucose into furan-based chemicals and their application.

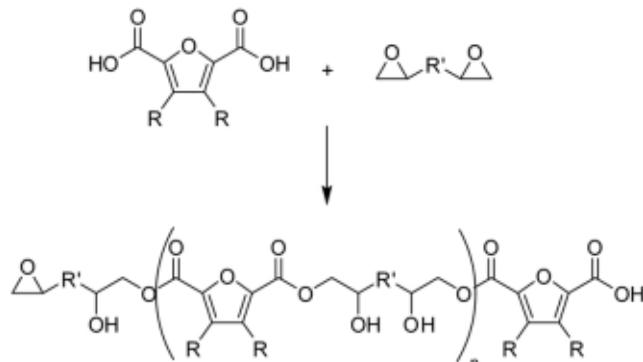


Figure 7. Preparation of polymers (adhesive/coating materials) using furanic compounds as a monomer derived from carbohydrate biomass.

량의 리그닌을 저분자량으로 분해할 수 있으나, 이러한 화학적 처리를 통해서만 단일 화합물이 아닌 다양한 혼합물 형태의 물질이 얻어지게 된다. 그래서 매우 일부분만이 향료 등으로 사용될 뿐 대부분은 태워지거나 버려지고 있는 실정이다[42]. 그러나 자연계에 존재하는 다양한 흙 속의 미생물들은 복잡한 신진대사 경로 상에서 리그닌을 다양한 방향족 물질들로 분해하여 이를 에너지원으로 사용하고 있는데, 최근에 폐펄프액에서 추출한 *Spingomoas paucimobilis* SYK-6가 β -aryl ether, biphenyl, diarylpropane과 같은 다양한 이량화 리그닌을 에너지원으로 활용할 수 있음이 보고되었다

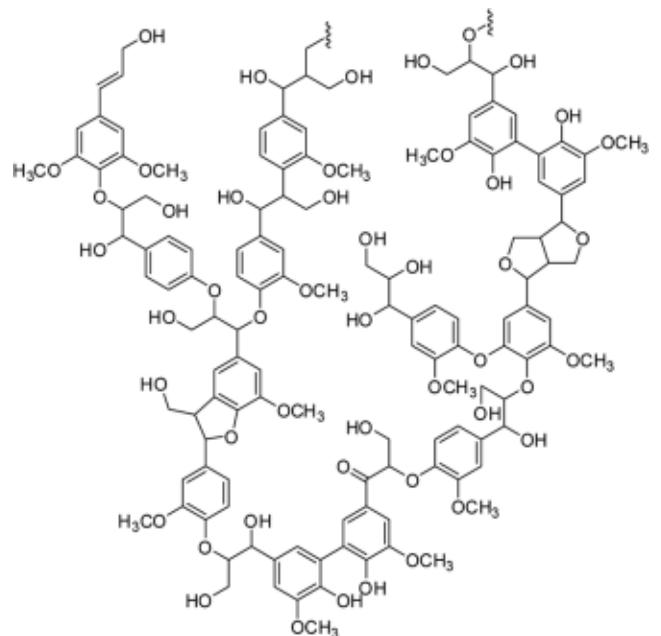


Figure 8. Representative chemical structure of lignin.

[43]. 그리고, β -aryl ether 분해[44,45], biphenyl 분해 [46,47]에 관여하는 효소와 유전자가 밝혀졌다. 이러한 연구에 힘입어 유전공학적 방법을 통해 리그닌으로부터 화학적으로 안정한 신진대사 중간물질인 2-Pyrone-4,6-dicarboxylic acid (PDC)를 생산하는 기술이 개발되었다.

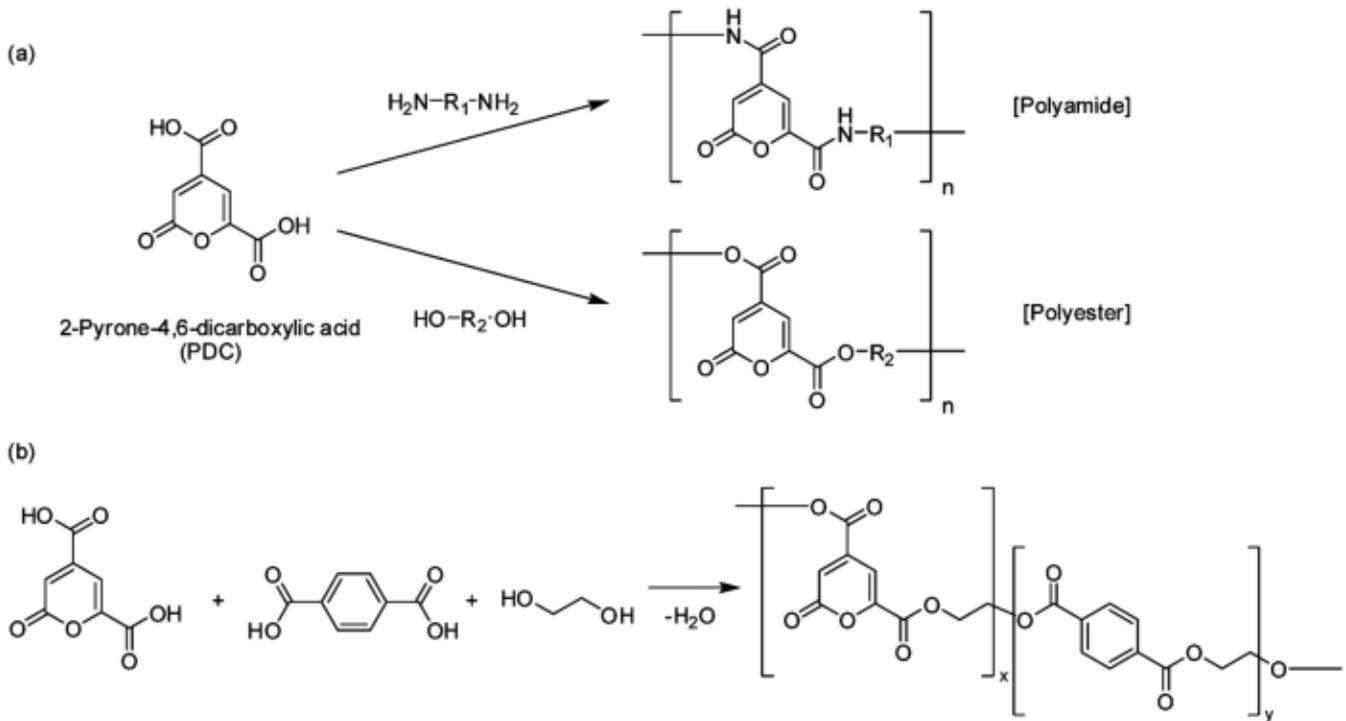


Figure 9. Preparation of (a) polymers and (b) adhesive materials using 2-Pyrone-4,6-dicarboxylic acid as a monomer biologically derived from lignin.

이렇게 생산된 PDC는 고분자 단량체로서 디올 또는 디아민과 함께 축합중합을 통해 폴리에스테르 또는 폴리아미드를 제조할 수 있다(Figure 9(a)). 최근 일본의 FFPRI (Forestry and Forest Products Research Institute)에서는 PDC와 테레프탈릭산을 에틸렌글리콜과 함께 축합중합을 통해 Figure 9b와 같은 형태의 폴리에스테르를 제조하였다(Figure 9(b)). 이 폴리에스테르는 210°C 까지 열적으로 안정하였으며, 금속, 유리 등에 매우 우수한 접착력을 나타내어 PDC 함량이 40~60%일 때 SUS 또는 알루미늄 간에 50~60 MPa에 이르는 접착력 (JIS K 6849 : 1994 인장강도 테스트)을 나타내었으며, 최고 90 MPa에 이르는 접착력도 달성하였는데, 이는 기존 에폭시 접착제를 스테인레스 스틸에 적용할 때 얻을 수 있는 접착력의 3배에 이르는 접착 성능으로 다양한 용도로 적용이 가능할 것으로 기대된다.

2.3. 해양계 바이오매스 자원

제3세대 바이오매스 공급원으로서 해양자원이 주목을 받고 있다. 해양자원은 가용 재배면적이 넓고, 담수, 토지, 비료 등의 사용으로 인한 원가상승의 효과가 거의 없으며, 육상 식물에 비해 성장성이 우수하여 단위 면적당 생산량이 높다. 따라서 해양계 바이오매스 자원을 새로운 공급원으로 활용하여 석유화학 대체 물질을 생산할 수 있는 전환기술의 개발은 탈석유화시대에

중요한 의미를 가질 것으로 기대된다. 해양자원으로 해조류는 현재 가장 활발한 연구가 진행 중인 공급원이다. 해조류는 크게 미세 해조류(Microalgae)와 거대 해조류(Macroalgae)로 나눌 수 있다. 미세 해조류는 유지계 바이오매스로부터 얻을 수 있는 트리글리세라이드가 다량 함유되어 있으며, 거대 해조류에는 글루칸과 갈락탄이라는 탄수화물 성분이 다량 함유되어 있다. 특히 목질계 바이오매스와는 달리 리그닌과 같은 제거하기 힘든 성분을 포함하고 있지 않기 때문에 전처리 과정이 매우 용이한 장점이 있다. 현재까지 해조류에 대한 연구는 주로 석유 대체 연료를 생산하기 위한 전환방법이 주를 이루어 왔으나, 향후 접착소재를 비롯한 유용한 화학물질로의 전환에 대한 연구도 급속히 진행될 것으로 예상된다.

3. 결 론

현재 세계 각국은 재생 및 지속사용 가능 식물성 바이오매스 자원으로부터 유래된 화합물을 통해 기존의 석유화학 기반 화합물을 대체하기 위한 연구개발을 광범위하게 진행 중에 있다. 유지계 식물성 바이오매스로부터 유래된 폴리올을 단량체로 하는 폴리우레탄 소재, 목질계 식물성 바이오매스의 함유 성분 중 셀룰로오스로부터 유래된 푸란계 화합물 유도체와 리그

닌으로부터 생물학적인 경로를 통해 얻어지는 PDC를 단량체로 하는 폴리에스테르 소재 등은 탄소중립형 친환경 소재로 Post-Kyoto 의정서가 발효되는 2013년 이후에 강화될 것으로 예상되는 탄소규제에 자유로우며, 물성이 우수하여, 향후 기존의 접착소재를 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 소재원천기술개발사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. J. Leggett, *Half gone: oil, gas, hot air and the global energy crisis*, Portobello Books, London (2005).
2. D. Meadows, *The limits to growth: the 30-year update*, Chelsea Green (2004).
3. H. Roper, *Starch-Starke*, **54**, 89 (2002).
4. F. W. Lichtenthaler, *Acc. Chem. Res.*, **35**, 728 (2002).
5. F. W. Lichtenthaler and S. Peters, *R. Chim.*, **7**, 65 (2004).
6. B. Kamm and M. Kamm, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **64**, 137 (2004).
7. J. H. Clark, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **82**, 603 (2007).
8. G. Braunegg, R. Bona, and M. Koller, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, **43**, 1779 (2004).
9. A. Gandini and M. N. Belgacem, *J. Polym. Environ.*, **10**, 105 (2002).
10. J. V. Kurian, *J. Polym. Environ.*, **13**, 159 (2005).
11. J. V. Kurian and Y. Liang, U. S. Patent 6,281,325 (2001).
12. D. E. Packham, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **29**, 248 (2009).
13. U. Biermann, W. Friedt, S. Lang, W. Lühs, G. Machmüller, J. O. Metzger, M. R. Klaas, H. J. Schäfer, and M. P. Schneider, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **39**, 2206 (2000).
14. F. D. Gunstone, *The Chemistry of Oils and Fats*, CRC Press LLC: Boca Raton, FL, (2004).
15. E. Geiger, N. M. Becker, and L. A. Armbruster, W. O. 2006/094227 (2006).
16. B. Gruber, U. S. Patent 5,026,881 (1991).
17. S. Sinadinović-Fišer, M. Janković, and Z. S. Petrović, *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **78**, 725 (2001).
18. T. Vlček and Z. S. Petrović, *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **83**, 247 (2006).
19. Z. Petrović, A. Guo, and I. Javni, U. S. Patent 6,107,433 (2000).
20. Z. Petrović, I. Javni, A. Guo, and W. Zhang, U. S. Patent 6,433,121 (2002).
21. A. Guo, Y.-J. Cho, and Z. S. Petrović, *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.*, **38**, 3900 (2000).
22. A. Guo, D. Demydov, W. Zhang, and Z. S. Petrović, *J. Polym. Environ.*, **10**, 49 (2002).
23. P. Kandamarachchi, A. Guo, D. Demydov, and Z. S. Petrović, *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **79**, 1221 (2002).
24. Z. S. Petrović, W. Zhang, and I. Javni, *Biomacromolecules*, **6**, 713 (2005).
25. J. E. Trout and R. G. Schafermeyer, U. S. Patent 6,504,003 (1999).
26. Z. S. Petrović, A. Guo, and W. Zhang, *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.*, **38**, 4062 (2000).
27. R. Gokarn, M. A. Eitemann, and J. Sridhar, *ACS Symp. Ser.*, **666**, 224 (1997).
28. K. L. Wasewar, A. A. Yawalkar, J. A. Moulijn, and V. G. Pangarkar, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **43**, 5969 (2004).
29. H. Kautola, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **33**, 7 (1990).
30. C. S. K. Reddy and R. P. Singh, *Bioresour. Technol.*, **85**, 69 (2002).
31. T. Willke and K. D. Vorlop, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **56**, 289 (2001).
32. Y. Hara, H. Izui, and H. Ito, U. S. Patent 2005/0196846 (2005).
33. M. Sato and N. Akiyoshi, EP Patent 1,233,070 (2002).
34. H. Ueda, T. Koda, and M. Sato, EP Patent 1,233,069 (2002).
35. A. Gandini and M. N. Belgacem, *Prog. Polym. Sci.*, **22**, 1203 (1997).
36. M. N. Belgacem and A. Gandini, *Handbook of Adhesive Technology*, Marcel Dekker, New York, NY (2003).
37. Y. Román-Leshkov, J. N. Chheda, and J. A. Dumesic, *Science*, **312**, 1933 (2006).
38. H. Zhao, J. E. Holladay, H. Brown, and Z. C. Zhang, *Science*, **316**, 1597 (2007).
39. J. B. Binder and R. T. Raines, *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 1979 (2009).
40. S. Lima, P. Neves, M. M. Antnes, M. Pillinger, N. Ignatyev, and A. A. Valente, *Appl. Catal. A*, **363**, 93 (2009).
41. J. K. Jerry II, A. W. Kawczak, H. P. Benecke, K. P. Mitchell, and M. C. Clingerman, U. S. Patent, 2008/

- 0081883 (2008).
42. D. Parke, D. A. D'argenio, and L. N. Ornston, *J. Bacteriol.*, **182**, 257 (2000).
43. E. Masai, Y. Katayama, S. Nishikawa, and M. Fukuda, *J. Ind. Microbiol. Biotech.*, **23**, 364 (1999).
44. E. Masai, Y. Katayama, S. Kawai, S. Nishikawa, M. Yamasaki, and N. Morohoshi, *J. Bacteriol.*, **173**, 7950 (1991).
45. E. Masai, Y. Katayama, S. Kubota, S. Kawai, M. Yamasaki, and N. Morohoshi, *FEBS Lett.*, **323**, 135 (1993).
46. X. Peng, T. Egashira, K. Hanashiro, E. Masai, S. Nishikawa, Y. Katayama, K. Kimura, and M. Fukuda, *Appl. Environ. Microbiol.*, **64**, 2520 (1998).
47. X. Peng, E. Masai, Y. Katayama, and M. Fukuda, *Appl. Environ. Microbiol.*, **65**, 2789 (1999).