

차세대 바이오연료의 R&D 현황과 이슈

박순철*, 이진석

Status and Challenging Issues of the Advanced Biofuels

Soonchul Park* and Jinsuk Lee

Abstract

Advanced biofuels are recognized as a key tool to mitigate the CO₂ emissions in the transport sector. Active R&D works have been carried out but there are still some major barriers to implement the technology. In this paper, recent developments on the advanced biofuels' technology are reviewed and the major barriers to commercialization of the biofuels will be discussed.

Key words

Advanced biofuels(차세대 바이오연료), Inedible biomass(비식용 원료), Drop-in(직접 사용), GHG reduction(온실가스 감축), LCA(전주기 분석)

(접수일 2014. 9. 4, 수정일 2014. 12. 12, 게재확정일 2014. 12. 12)

* 한국에너지기술연구원 제주 글로벌센터 해양 융복합연구실 (영문 소속)

■ E-mail : bmscpark@kier.re.kr ■ Tel : (064)800-2230 ■ Fax : (064)800-2301

Nomenclature

BtL : biomass to liquid fuels

F-T : Fisher-Tropsch

HBD : hydrotreating biodiesel

LCA : life cycle analysis

SSCF : simultaneous saccharification and co-fermentation

SSF : simultaneous saccharification and fermentation

1. 서론

국제에너지기구(IEA)에서는 기후 변화 문제가 해결되기 위해서는 대기중 CO₂ 농도를 450ppm 이하로 낮추어야 한다는 450 시나리오를 발표한 바 있다. 동 시나리오에 따른 CO₂

감축 목표 달성을 위해서는 발전 및 산업 부문뿐만 아니라 수송 부문에서의 CO₂ 감축이 중요할 것으로 나타났다. 450 시나리오 실현을 위한 수송 부문의 CO₂ 감축목표 달성을 위해서는 전체 수송 연료 소비의 약 27%가 바이오연료로 보급되어야 할 것으로 분석되었다⁽¹⁾. 2012년 기준 전체 수송 부문에서의 바이오연료 점유율이 약 3% 인 점을 고려할 때⁽²⁾ 450 시나리오 달성에 필요한 바이오연료 보급 실현을 위해서는 해결해야 되어야 할 많은 문제점들이 있다.

첫 번째 문제는 원료의 안정적 수급이다. 즉 전 세계적으로 기후변화 문제가 본격적으로 이슈화된 2005년 이후 수송용 바이오연료의 생산은 가파르게 증가하였으나 2010년 이후 바이오연료생산은 원료로 사용되는 곡물 가격이 폭등함에 따라 증가세가 멈추었다. 하지만 앞에서 언급한대로 기후변화 문제를 해결하기 위해서는 지금보다 9배 많은 양의 바이오연료 보급이 필요하므로 이를 위한 원료 수급 방안이 마련되어야 한다. 두 번째로 현재 수송용 바이오연료로 사용되는 바이오에탄올과 바이오디젤은 연료 물성이 좋지 않아 각각 최대

허용 혼합율이 10%와 7%이다. 하지만 450 시나리오 실현을 위해서는 바이오연료 혼합율이 최소 27% 이상으로 높아져야 하므로 연료물성이 우수한 새로운 바이오연료 개발이 필요하다. 세 번째로 바이오연료의 보급 목적이 수송 부문에서의 CO₂ 감축이지만 현재 보급중인 바이오연료는 전주기 분석(LCA)시 CO₂ 감축 효과가 높지 않으므로 보다 CO₂ 감축 효과가 높은 바이오연료 보급이 중요하다. EU와 미국은 바이오연료 보급에 의한 CO₂ 감축효과를 높이기 위해 보급 바이오연료의 LCA 기준 최소 CO₂ 감축율을 2014년 이후 35%, 2018년 이후 50% 이상으로 강화 예정이다⁽³⁾. 이러한 CO₂ 감축율을 갖는 바이오연료의 개발을 위해서는 원료뿐만 아니라 생산 공정의 효율개선도 중요하다. 마지막으로 바이오연료의 경제성 개선을 위한 기술 개발이 필요하다. 본 고에서는 이러한 이슈들을 해결하기 위해 진행되고 있는 국내외 연구동향에 대해 소개하고자 한다.

2. 차세대 바이오연료 R&D 동향

2.1 비식용 원료 활용

본 고에서는 차세대 바이오연료를 현재 보급중인 연료와 차별성을 갖는 연료로 정의하고 ① 원료 ② 연료 물성 ③ 적용처 등의 차별성 기준에서 차세대 바이오연료를 도출하였다.

원료 관점에서 보면 현재의 바이오연료가 모두 곡물을 원료로 사용하므로 비식용 바이오매스로부터 만들어진 바이오연료는 모두 차세대 바이오연료에 해당된다. 이러한 비식용 바이오매스의 대표로는 목질계(셀룰로스)와 해조류 등이 있다. 비식용원료로부터 바이오연료 생산 공정은 생물학적 기술과 열화학적 기술로 구분 가능하다. 즉 아래 Fig. 1에 나타

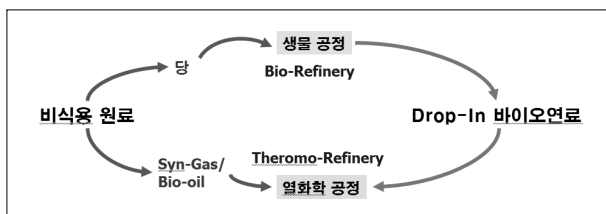


Fig. 1 Reaction pathways for advanced biofuels

낸바와 같이 바이오매스로부터 당을 추출하면 미생물에 의해 연료로 전환 가능하다. 목질계 원료를 산소가 부족한 조건에서 열분해하면 바이오오일 또는 합성 가스를 생산할 수 있으며 이러한 중간체는 화학 촉매 전환 공정에 의해 역시 바이오연료로 전환 가능하다. 대표적인 생물전환 공정과 열화학 전환 공정의 R&D 현황에 대해 기술한다.

2.1.1 목질계 에탄올

목질계 에탄올 연구는 1차 석유 파동이 있었던 1970년대 처음 시작되었다. 처음에는 목질계 바이오매스의 주요 구성 성분인 셀룰로스를 미생물이 소화 가능한 글루코스로 분해하는 효소(셀룰라제) 생산과 발효에 의해 효율적으로 에탄올로 전환이 가능한 글루코스만이 원료로 검토되었다. 하지만 이후 공정 기술 개발 연구를 통해 셀룰로스 당화와 글루코스 발효를 통합한 동시당화 발효 공정(Simultaneous saccharification and fermentation, SSF)과 별도 미생물에 의한 C5의 발효 공정 개발되었다. 이후 생명공학 기술의 발전으로 C5와 C6를 동시에 발효할 수 있는 균주의 개발이 가능해짐으로써 당화와 발효를 한 반응기에서 수행하는 동시 당화 혼합 발효 공정(Simultaneous saccharification and cofermentation, SSCF)이 가능하게 되었다. 현재에는 한 미생물에 효소 생산과 에탄올 발효 관련 유전자를 모두 도입하여 한 반응기에서 전처리된 바이오매스로부터 직접 에탄올을 생산하는 공정(Consolidate bio processing, CBP)개발에 대한 연구가 진행되고 있다⁽⁴⁾.

2.1.2 BtL

목질계 바이오연료의 또 다른 생산 공정의 축은 열화학적

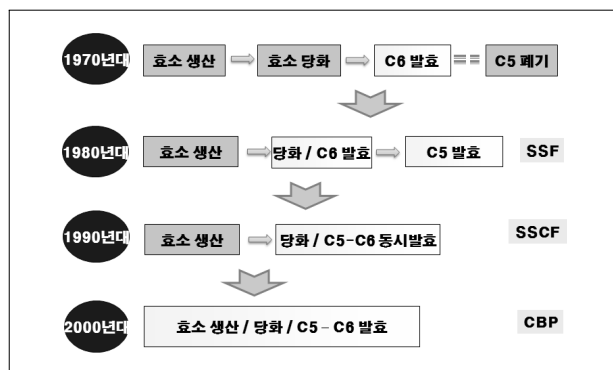


Fig. 2 Technology developments for cellulosic ethanol

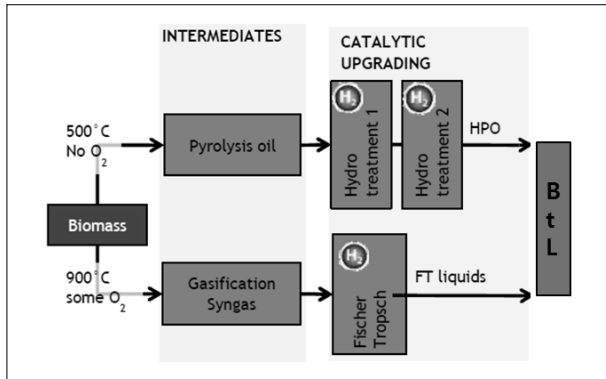


Fig. 3 Reaction pathways for BtL.⁽⁵⁾

전환에 의한 바이오연료 생산기술이다. 바이오매스는 산소가 부족한 조건에서 고온 열분해하면 적용 온도에 따라 바이오일(500°C 내외) 또는 합성 가스(800°C 이상)가 생산된다. 이러한 중간체를 촉매 개질 또는 합성에 의해 바이오연료로 전환 가능하다(Fig. 3).

독일의 Choren은 목질계 바이오매스를 가스화하여 촉매에 의해 F-T 디젤을 생산하는 공정을 개발하였으나 경제성 확보를 위해서는 년 20만톤 연료 생산 규모의 공장 설립이 필요하지만 원료의 확보 어려움으로 상용화 연구는 중단되었다. 따라서 보다 소규모 공정에서 경제성을 가질 수 있도록 공정의 효율 개선 연구가 진행되고 있다. 바이오오일은 보다 소규모 공정에서 적용 가능하다는 장점은 있으나 생성된 바이오오일의 개질에 적합한 고효율 촉매 공정개발이 핵심 이슈로 되어 있다.

2.1.3 해조류 바이오연료

향후 급증할 바이오에너지 수요에 대응하기 위해서는 제한된 육상뿐만 아니라 해양을 활용해야 한다는 인식이 확산됨에 따라 해양 바이오매스를 대량 생산하여 바이오연료 생산 원료로 활용하려는 연구도 활발히 진행되고 있다. 바이오매스 자원이 실제 존재하는 목질계와 달리 해양 바이오매스는 자원 확보에 대한 불확실성이 장애요인으로 나타났다. 즉 해양 바이오매스중 특히 유망 종으로 검토되고 있는 미세조류의 경우 태양광을 에너지원으로하는 독립 영양(autotroph) 배양과 유기 탄소를 에너지원으로 하는 종속 영양(heterotroph) 배양 등이 있지만 대규모 생산공정의 경우 유기 탄소의 안정적 공급이 어려울 수 있으므로 독립 영양 배양 기술 개발 연

구가 보다 활성화되었다. 하지만 주 에너지원인 태양 광의 활용 효율은 반응기 부피가 증가하면 급격히 떨어지므로 아직 양산 기술이 개발되지 않았다.

이외에도 미세조류의 경우 배양액의 균체 농도는 2g/l 이하로 매우 낮아 기존 기술로는 바이오매스 수확에 많은 에너지가 소모되므로 보다 효율 높은 미세조류의 수확, 농축 기술의 개발이 필요하다. 하지만 이런 부분에 대한 연구는 아직 초보 수준이어서 보다 많은 연구가 진행되어야 한다. 해조류 바이오연료가 실제 보급되기 위해서는 바이오연료 전환 기술 보다는 원료 확보 관련 기술 개발이 더 시급한 것으로 판단된다.

2.2 바이오연료 물성 개선

현재 보급중인 바이오연료인 바이오에탄올과 바이오디젤은 석유계 연료와 물성 차이로 인해 매우 제한된 농도 이하에서만 혼합 사용이 허용되고 있다. 즉 에탄올과 바이오디젤은 각각 10% 또는 7% 이하 농도에서만 혼합이 허용된다. 바이오연료의 고 함량 혼합을 위해서는 바이오연료 물성 개선이 중요하다. 이러한 물성 개선의 핵심은 바이오연료에 포함된 산소를 제거하는 탈산소이다. 현재 탈산소를 위해 검토되는 공정은 수소 첨가에 의한 수소화 반응(hydrogenation)과 수소 첨가없이 진행되는 탄소 산화 반응(decarboxylation)이 있다(Fig. 4).

수소 첨가 반응(Hydrodeoxygenation)은 바이오연료 수율을 높일 수 있다는 장점은 있으나 외부에서 수소가 공급되어야 한다는 문제점이 있으며 탄소 산화반응은 외부 수소 공급원은 필요 없지만 탄소의 손실로 인한 바이오연료 수율의 저하 문제가 있다. 따라서 수소의 대량 공급원이 없는 경우에는 탄소 산화에 의한 탈탄소 기술의 적용이 필요하다. 현재 물성 개선 바이오연료는 수첨 바이오디젤(Hydrotreating biodiesel, HBD)이 유일하게 상용화되었다⁽⁶⁾.

바이오에탄올은 가솔린에 비해 산소 함량이 높을 뿐만 아니라 저분자이어서 물성이 매우 다르다. 따라서 보다 분자량이 큰 부탄올에 대한 관심이 높아지고 있다. 바이오부탄올은 에탄올에 비해 산소 함량이 낮을 뿐만 아니라 분자량이 커 연료 물성은 우수하지만 미생물에 대한 독성이 강해 발효 공정에 의해 생산 가능한 최대농도가 2% 내외로 에탄올에 비해

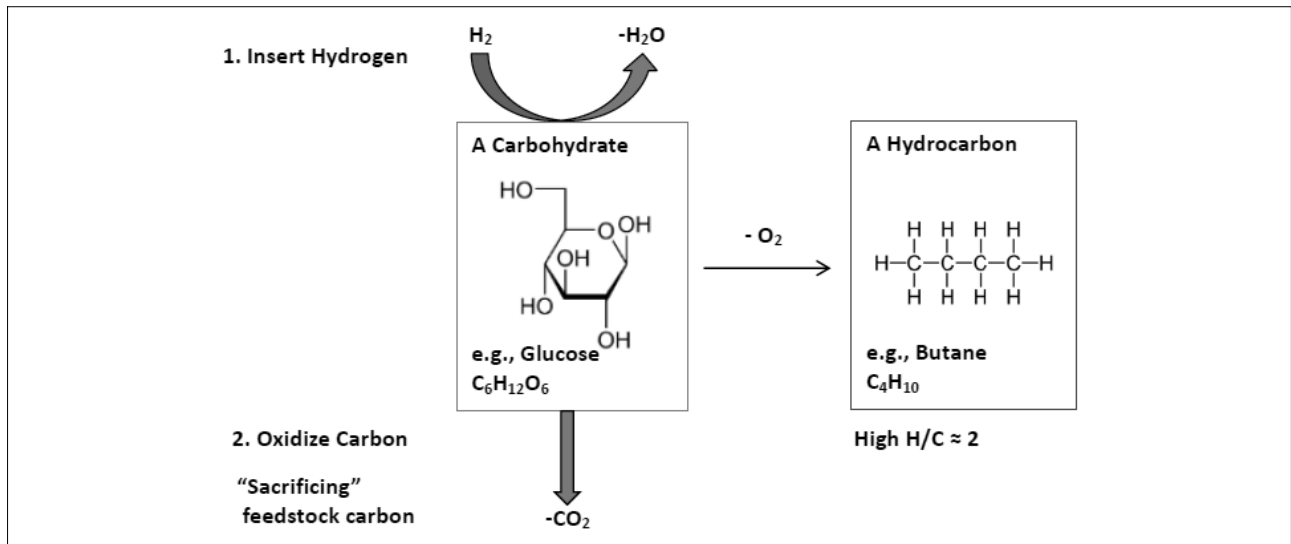


Fig. 4 Simplified representation of carbohydrate deoxygenation mechanisms⁽⁵⁾

1/6 수준으로 매우 낮다⁽⁷⁾. 따라서 바이오부탄올의 농축 에너지 비용이 너무 높아 현재 상용화에 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 부탄올에 대한 내성이 강화된 균주 개발과 아울러 보다 저에너지소비형 부탄올 정제 기술개발에 대한 연구가 진행되고 있다.

최근에는 보다 석유계 연료 물성에 근접한 바이오연료 개발을 위해 화학축매 또는 생물 축매를 활용한 바이오매스의 long chain 탄화수소 전환에 대한 연구가 진행되고 있다.

2.3 CO₂ 감축 효율

현재 보급중인 바이오연료는 곡물로부터 만들어졌다는 문제 외에도 CO₂ 감축효과에 대해 많은 논란이 제기되고 있다. 실제 가장 많이 보급되고 있는 옥수수로부터 생산된 에탄올의 경우 LCA 분석시 공정 연료를 석탄으로 활용한다면 가솔린에 비해 CO₂가 3% 더 많이 발생하여 실제 온난화 문제를 악화시키는 것으로 보고되었다⁽⁸⁾. 옥수수 농장에서 발생하는 부산물을 에너지원으로 활용할 경우 CO₂ 저감율은 최대 약 50%까지 높일 수 있는 것으로 나타났다. 또한 원료를 옥수수가 아닌 목질계 원료로 대체할 경우 에탄올의 CO₂ 저감율은 약 86%까지 증가하는 것으로 보고되었다⁽⁸⁾. 이러한 연구결과는 바이오연료에 사용에 따른 CO₂ 감축 효율은 사용 원료뿐만 아니라 적용 공정 기술에 따라 크게 달라짐을 보여준다.

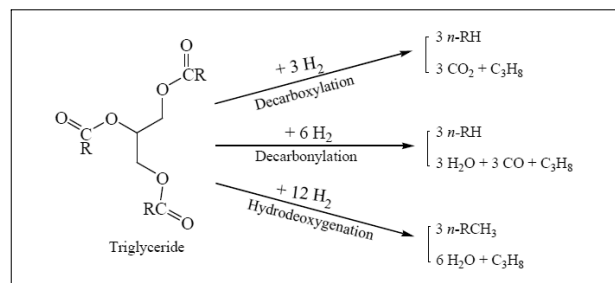


Fig. 5 Three pathways to deoxygenate a triglycerides⁽¹⁰⁾

2.4 바이오항공유

현재 보급중인 바이오연료인 바이오에탄올, 바이오디젤은 모두 차량을 적용 대상으로 하지만 최근에는 항공 부문에서의 CO₂ 감축 필요성이 높아짐에 따라 바이오항공유 기술개발에 대해서도 연구가 진행되고 있다. 바이오항공유 생산 공정은 유지계와 목질계 원료를 활용하는 방안에 대해 검토중이며 유지계 바이오매스의 경우 UOP 등에서 상용화 기술을 개발한 바 있다. 유지계 원료로부터 바이오항공유 생산 기술개발의 핵심 과제는 탈산소와 이성화이다⁽⁹⁾.

탈산소의 경우 외부에서 수소 첨가하는 공정(수첨 공정)과 수소 공급 없이 탈산소하는 공정(탈탄소 공정) 등 두 가지 기술개발 연구가 진행되고 있다(Fig. 5). 전자의 경우 1 mol의 유지를 탈산소하는데 12 mol의 수소가 필요하여 다량의 외부

수소 공급원이 필요하다는 제한점이 있다. 따라서 바이오항공유 생산에 필요한 수소의 확보를 위해 다량의 부생 수소가 발생하는 정유공장과 연계한 플랜트가 건설되고 있다. 동 공정에서는 황화물계 금속 촉매가 적용되며 UOP 등에 의해 상용화되었다.

탈 탄소공정은 수소에 의한 환원 반응이 아닌 탄소의 산화에 의해 산소 제거가 이루어지므로 수소 요구량이 수침 반응의 1/2 또는 1/4로 매우 낮다는 장점은 있지만 원료 유지에 포함된 탄소의 손실이 높다는 단점이 있다. 하지만 탈 탄소공정은 수소의 대량 외부 공급원이 필요없어 독립형 바이오항공유 생산 공정으로 유망하지만 아직 기술 개발 단계이다. 현재 귀금속 계열의 Pd, Pt 등이 우수한 활성을 갖는 것으로 보고되었으며 촉매 비용을 낮추기 위해 Ni과 같은 보다 값싼 금속 촉매를 적용하려는 연구가 진행되고 있다. 동 공정에서는 반응 부산물에 의한 촉매 피독과 그에 따른 촉매 활성 저하가 상용화의 가장 큰 장애 요인으로 지적되고 있다.

목질계 원료로부터 바이오항공유 생산 연구는 앞에 기술한 BtL 기술에 기반하여 연구가 진행중이며 낮은 항공유 수율이 상용화의 주 장애 요인으로 나타났다. 기술 주기상 목질계 원료 기반 바이오항공유는 유지 기반 바이오항공유 기술에 비해 보다 긴 시간의 연구가 필요할 것으로 보인다.

3. 차세대 바이오연료 이슈

차세대 바이오연료는 비식용원료를 활용한다는 점에서 매우 바람직하지만 아직 생산단가가 매우 높다는 문제점이 있다. 따라서 차세대 바이오연료의 경제성 개선을 위한 기술개발이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 경제성 개선의 핵심은 고효율 촉매 적용에 의한 공정 단순화 및 바이오연료 수율 제

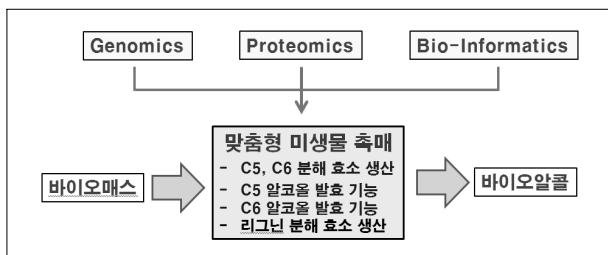


Fig. 6 Biocatalyst for the consolidate bioprocess

고이다.

최근 생명공학기술이 발전함에 따라 다양한 발효 기능을 갖는 맞춤형 미생물 촉매 개발이 특히 집중 연구되고 있다. 즉 Fig. 6에 나타낸바와 같이 목질계 에탄올 생산 공정의 경우 과거에는 효소 생산과 C5, C6 발효가 각각 다른 균주에 의해 이루어졌으나 최근에는 발효 관련 각 유전자를 모두 포함하는 맞춤형 균주 개발을 통해 목질계 에탄올 생산 공정의 단순화를 통해 에탄올 생산 비용을 낮추려는 연구가 진행되고 있다⁽⁴⁾.

최근에는 바이오매스로부터 직접 석유계 탄화수소와 동일한 물성을 갖는 바이오가솔린으로 전환하는 균주 개발에 대한 연구 결과가 발표된바 있다⁽¹¹⁾.

목질계 바이오연료 생산 공정에서 가장 큰 걸림돌인 당 추출 공정의 어려움을 피하기 위해 목질계 원료를 열분해 가스화 후 생성된 합성 가스를 미생물에 의해 연료로 전환하는 융합공정도 개발되고 있다(Fig. 7). 동 기술에서는 생물공정에 의한 목질계 연료 생산의 핵심 난제인 전처리를 피할 수 있다는 장점은 있으나 합성가스의 물에 대한 용해도가 낮아 기질로서 미생물과 접촉 효율이 낮다는 문제점이 있다. 따라서 반응 속도 및 수율 개선을 위해서는 합성가스 기질의 미생물 촉매와 보다 효율적으로 접촉할 수 있는 공정 개발이 필요하다.

4. 결론

기후변화와 에너지 고갈 문제의 해결을 통한 지속 성장 실현을 위해서는 바이오연료의 보급 확대가 필요하다. 이러한 바이오연료 보급 확대가 실현되기 위해서는 원료의 안정적인 공급 방안, 고함량 사용 및 온실 가스 감축 효율 제고 등이 중요하다. 비식용 바이오매스로부터 생산한 차세대 바이오연료는 위에 언급한 요구 특성을 충족하여 유망하지만 아직 경제성 확보가 되지 않아 상용화에 어려움을 겪고 있다. 하지만

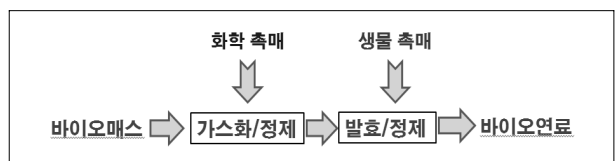


Fig. 7 Hybrid process for biofuels

차세대 바이오연료는 우리 사회의 지속 성장 실현에 핵심 견인차이므로 양산 공정 실현을 위해 지속적인 연구 투자가 필요하다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 일환으로 수행되었습니다(과제 번호 20138520091130).

References

- [1] IEA, World Energy Outlook, 2010.
- [2] IEA, Renewable Energy - Medium term market report, 2014.
- [3] EC, Climate Action, http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/fuel/index_en.htm
- [4] Zyl, W.H. Lynd, L.R., Haan, R., McBride, J.E., "Consolidated bioprocessing for bioethanol production using *Saccharomyces cerevisiae*", *Adv. Biochem. Eng.*, Vol. 108, pp. 205-235, 2007.
- [5] IEA Bioenergy Task 39, The potential and challenges of drop-in biofuels, Report T39-T1 September (2013) Paris: OECD Publishing.
- [6] Huber, G.W., O'Connor, P., Corma, A., "Processing biomass in conventional oil refineries: Production of high quality diesel by hydrotreating vegetable oils in heavy vacuum oil mixtures", *Appl. Catal. A: General*, Vol. 329, pp. 120-129, 2007.
- [7] Lin, X., Wu, J., Jin, X., Fan, J., Li, R., Wen, Q., Qian, W., Liu, D., Chen, X., Chen, Y., Xie, J., Bai, J., Ying, H., "Selective separation of biobutanol from acetone-butanol-ethanol fermentation broth by means of sorption methodology based on a novel macroporous resin", *Biotechnol Prog.*, Vol. 28, pp. 962-972, 2012.
- [8] Wang, M., Wu, M., Huo, H., "Life-cycle energy and greenhouse gas emission impacts of different corn ethanol plant types", *Environ. Res. Lett.*, Vol. 2, pp. 024001, 2007.
- [9] Liu, G., Yan, B., Chen, G., "Technical review on jet fuel production", *Ren. Sustain. Energy. Rev.* Vol. 25, pp. 59-70, 2013.
- [10] Wang, C., Liu, Q., Liu, X., Lijun, Y., Luo, C., Wang, L., Wang, B., "Influence of reaction conditions on one-step hydrotreatment of lipids in the production of *iso*alkanes over Pt/SAPO-11", *Chinese J. Catal.*, Vol. 34, pp. 1128-1138, 2013.
- [11] Choi, Y.J. and Lee, S.Y., "Microbial production of short chain alkanes", *Nature*, Vol. 502, pp. 571-574, 2013.

박 순 철



1978년 서울대학교 화학공학과 공학사
1980년 한국과학기술원 화학공정공학과 공학석사
1991년 Aix-Marseille I 대학교 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 제주글로벌연구센터 책임연구원
(E-mail : bmscpark@kier.re.kr)

이 진 석



1980년 고려대학교 화학공학과 공학사
1982년 고려대학교 화학공학과 공학석사
1989년 Lehigh 대학 화학공학과 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 책임연구원
(E-mail : bmjlee@kier.re.kr)