

곤충 유래 바이오디젤의 국내 생산 가능성에 관한 고찰

박조용[†]

한국석유관리원 석유기술연구소

(2019년 10월 16일 접수: 2019년 12월 28일 수정: 2019년 12월 29일 채택)

Prospects of Insect Biodiesel Production in Korea: A review

Jo Yong Park[†]

K-Petro, Research Institute of Petroleum Technology

(Received October 16, 2019; Revised December 28, 2019; Accepted December 29, 2019)

요 약 : 바이오디젤은 신재생연료이면서 환경 친화적인 수송용 액상 바이오연료이다. 곤충은 새로운 바이오디젤 원료로 여겨지고 있다. 특히, 동애등에는 높은 지질을 함유하고 있어 재생가능한 바이오디젤 원료이다. 동애등에 유래 바이오디젤은 포화지방산 함량이 높고 다불포화지방산 함량이 낮아 품질이 좋은 바이오디젤을 만들 수 있다. 동애등에 유래 바이오디젤은 EN 14214의 대부분 품질기준을 만족한다. 동애등에는 기존의 식물성 원료, 미세조류에 비해 지질 수율이 높아 바이오디젤 생산성이 높다. 본 논문에서는 곤충 유래 바이오디젤의 전반적인 생산 방법과 품질 특성에 대해 서술하였다.

주제어 : 곤충, 동애등에, 지방산, 바이오디젤, 바이오디젤 생산성

Abstract : Biodiesel is a renewable and environmentally friendly liquid biofuel for transportation. Insect is considered as a new valuable biomass to convert into biodiesel. In particular, BSF(Black Soldier Fly) containing high fat is a renewable source of biodiesel. Biodiesel derived BSF has high concentration of saturated fatty acid methyl ester and low concentration of polyunsaturated fatty acid methyl ester which makes it potentially an ideal substrate for producing excellent quality biodiesel. Most of the fuel properties of BSF biodiesel were met the requirements of standard EN 14214. BSF have a higher lipid yield and biodiesel productivity as compared to microalgae and vegetable oils. This review paper includes the overall summary and compilation of the insect research conducted on biodiesel production and includes the BSF biodiesel properties.

Keywords : *Insect, Black soldier fly, Fatty acid, Biodiesel, Biodiesel productivity*

[†]Corresponding author
(E-mail: joypark@kpetro.or.kr)

1. 서론

바이오연료는 화석연료의 소비를 줄일 수 있는 대체연료로 여겨지고 있다. 바이오연료에는 바이오에탄올, 바이오디젤 등이 있으며 바이오매스를 전환하여 생산한다. 바이오연료는 신재생 원료를 사용한다는 환경적인 이점으로 인해 석유대체연료로 사용되고 있지만 생산 비용, 사용제한 등의 문제를 갖고 있다[1-3].

바이오연료 중에서 바이오디젤은 동·식물성 지질과 메탄올을 촉매 하에서 에스테르화 반응으로 생산한다. 바이오디젤은 자체 윤활성, 높은 인화점, 생물학적 분해, 낮은 황 함량 등과 같은 많은 이점을 가지고 있다. 촉매는 산촉매, 염기촉매, 고체촉매 등이 사용되며 지질의 자유지방산(FFA, free fatty acid) 함량에 의해 결정된다. 바이오디젤의 생산 비용에서 원료가 차지하는 비중이 가장 크기 때문에 미세조류, 폐식용유, 고산가유지 등의 다양한 원료를 사용하려는 노력을 계속하고 있다[4-6].

바이오디젤의 원료는 크게 4가지로 나눌 수 있으며 유채유, 대두유, 팜오일 등과 같은 식용 가능한 원료, 자트로파유, 커피찌꺼기 지질 등과 같은 비식용 원료, 돈지, 우지 등과 같은 동물성 유지, 미세조류, 박테리아 등과 같은 원료로 나눌 수 있다. Table 1에서와 같이 지질 함량은 바이오디젤 원료를 선택하는 가장 중요한 요소이다.

Table 1. Estimated oil contents of different biodiesel feedstocks[7]

| Feedstocks | Oil contents(%) |
|------------|-----------------|
| Soybean | 15 ~ 20 |
| Rapeseed | 38 ~ 46 |
| Coconut | 63 ~ 65 |
| Palm | 30 ~ 60 |
| Jatropha | 35 ~ 40 |
| Microalgae | 30 ~ 70 |
| BSF | 30 ~ 60 |

바이오디젤은 국내에서 2018년부터 3%로 향상되어 경유에 의무혼합되어 사용되고 있다. 국내 바이오디젤 원료는 팜 계열의 수입 원료가 60%, 폐식용유 위주의 국산 원료가 40%로 원료 공급

이 불규칙한 해외 의존도가 높고 폐식용유의 수거한계로 국산 원료의 확보가 어려운 상황이다. 또한, 바이오디젤은 생산단가의 약 70%가 원료 가격에 의존하고 있어 국산 원료 확보가 중요하다[6].

현재, 바이오디젤 원료로서 곤충을 이용하려는 많은 연구가 진행되고 있다. 곤충은 높은 지질 함량, 짧은 생애주기, 높은 재생산율을 갖기 때문이다. 특히, 동애등에(BSF, black solid fly, *Hermetia illucens*)의 유충은 가장 가능성이 있는 바이오디젤 원료로 보고되고 있다. 이러한 곤충들은 동물, 식물로부터 유래한 다양한 유기성 폐기물을 먹고 자라기 때문에 바이오디젤 원료로서 생산비용 및 공정 설비를 저감할 수 있고 폐기물을 에너지화할 수 있는 방법이다[1, 8-11].

본 논문에서는 새로운 바이오디젤 원료로서 곤충(동애등에) 지질의 가능성을 알아보기 위해 동애등에 사육에서부터 지질 추출, 바이오디젤 합성까지 알아보았다. 동애등에 지질과 바이오디젤의 연료 특성을 기존 식물성 원료와 비교하였다. 또한, 곤충 유래 바이오디젤의 생산성을 기존의 원료와 비교하여 국내 생산 가능성을 알아보았다.

2. 곤충 유래 바이오디젤 생산

2.1. 곤충 사육 및 지질 추출 방법

곤충으로부터 추출된 지질은 바이오디젤의 원료로 사용할 수 있다. 특히, 곤충 중에서 동애등에는 음식물 쓰레기를 먹이원으로 하기 때문에 환경문제까지 해결할 수 있는 원료이다. 또한, 지질 추출 부산물은 동물 사료로 이용될 수 있다. 음식물 쓰레기로부터 곤충을 거쳐 바이오디젤과 동물사료로 이용되는 전과정을 Fig. 1에 나타내었다.

동애등에는 전세계에 분포하고 있으며 유충의 무게는 220 mg까지 성장하고 길이 27 mm, 6 mm 두께까지 성장한다. 동애등에 유충은 동물의 배설물, 과일, 식물성 폐기물 등의 유기물질 등을 먹고 자란다. 2주안에 성충으로 성장시키는 것이 이상적이지만 사육 환경에 따라 성장속도는 큰 영향을 받는다. 곤충의 지질 추출은 생육과정에서 유충 단계에서 얻게 된다. 사육을 거친 유충들은 약 60 °C에서 수분함량이 5 ~ 8%를 포함할 정도로 건조한다. 건조된 유충들은 물리적 또는 화학적 방법으로 바이오디젤 합성을 위한 지질이

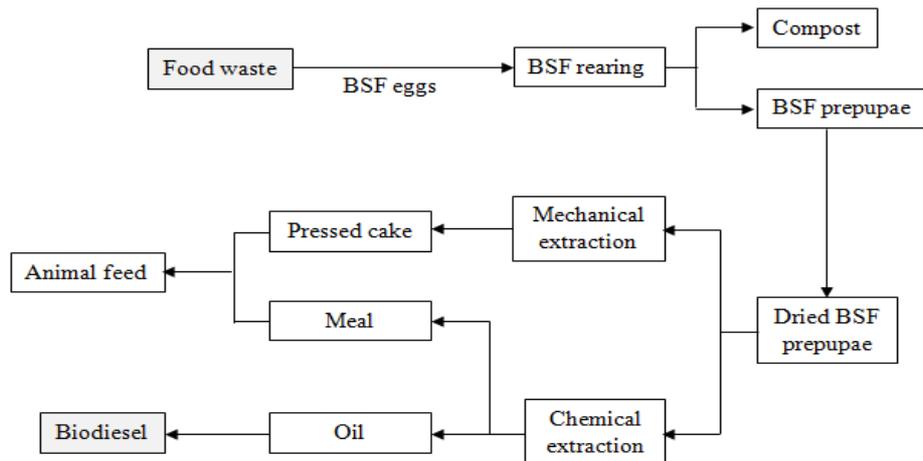


Fig. 1. Schematic presentation of bioconversion of food waste to biofuel and animal feed[8].

추출되고 남은 부산물은 동물의 먹이로 이용된다 [8].

통에 등에 사육장은 인근 지역의 음식물 쓰레기를 먹이로 사육하기 때문에 음식물 처리장과 인접하는 것이 좋다. Li와 Zheng 등은 인근 지역의 음식물 쓰레기와 볏짚을 먹이로 하고 사육 환경을 27 °C 온도에서 70%의 수분 조건을 유지하였다. 21일이 지난 후에 사육된 유충들은 110 °C의 물로 30분 동안 세척하고 50 °C에서 2일 동안 건조하였다. 추출하기 전에 건조된 유충들은 밀링(milling)으로 분말로 만들고 4 °C에서 보관하였다[1, 9]. Nguyen 등은 온도 30 °C, 습도 65%의 조건에서 20일 동안 사육하고 물로 세척하였다. 105 °C에서 10 min 동안 가열하여 60 °C에서 2일 동안 건조하였다. 추출하기 전에는 4 °C에서 저장되고 hexan을 사용하여 추출하였다 [12].

유충으로 자란 통에 등에는 남은 먹이와 분변토로부터 분리해야한다. 유충을 분리하는 방법은 곤충의 특성을 이용하여 사육장의 경사를 형성하여 유충의 탈출 공간을 한 방향으로 하여 분리하거나 적정 온도를 가하여 탈출을 유도하는 방법을 사용한다.

분리된 곤충 유충은 추출 효율을 높이기 위해 수분 함량을 5 ~ 8%를 유지해야 하며 열풍 또는 마이크로파를 이용하여 건조한다. 건조된 곤충은 60 °C에서 24 hr 동안 지질을 추출하며 추출 전·후의 무게를 측정하여 지질 추출효율을 계산

한다. 지질 추출 방법은 기계적 방법과 용매 추출 방법이 주로 사용된다. 추출된 지질에 포함된 물, 펙틴, 인지질, 고체불순물 등의 불순물들은 황산을 이용하여 제거한다. 기계적 추출 방법은 가장 일반적인 방법으로 기계적인 압축을 통해 지질을 추출한다. 기계적인 압축은 곤충에 함유된 지질의 60 ~ 80% 정도 추출이 가능하다. 기계적 방법은 유압식 착유기, 익스펠러(expeller) 착유기가 대표적이다. 유압식은 탈지 효율이 낮고 연속 작업이 어려워 대량 착유 방법으로는 적합하지 않은 반면에 익스펠러는 연속 작업이 가능하고 탈지막 분리를 연속적으로 할 수 있다[13, 14].

용매추출 방법은 지질이 용해되는 용매를 사용한다. 곤충이 갖고 있는 지질의 약 90%까지 추출이 가능하다. 분쇄된 유충의 입자 크기, 용매의 종류, 온도 등의 많은 인자들이 영향을 준다. 입자의 크기는 입자와 용매와의 접촉 면적과 관련이 있고 온도는 추출되는 비율과 관련이 있다. 추출 온도가 증가할수록 용해도는 증가한다. Zi-zhe 등은 분쇄된 곤충 유충과 hexan을 1:6으로 혼합하고 60 °C에서 8 hr 동안 교반하면서 지질을 추출하였다. hexan은 약 50 °C에서 감압증류를 통해 제거하였다. 용매추출법은 기계적 추출 방법보다 추출 효율이 좋은 반면에 추출 용매를 제거해야 하고 탈지막에 남아 있는 용매에 의해 탈지막을 사료로 사용하는데 제약이 따를 수 있다[10].

2.2. 곤충(동애등애) 지질 특성

추출된 지질은 약간의 노란색을 띄며 특유의 냄새가 난다. Table 2에서 지질의 요오드가는 지질에 함유된 불포화지방산과 관련이 있다. 비누화값(saponification)은 KOH의 양으로 나타내며 지질의 평균적인 분자량을 측정하기 위해 사용된다. 녹는점은 지질의 어는점과 관련이 있고 과산화물가는 저장과정의 산패와 관련된다. 그리고 산가는 자유지방산의 양과 관련이 있다[15].

곤충(동애등애) 지질의 높은 산가는 자유지방산 함량이 높기 때문에 자트로파유의 5.4 mg-KOH/g 보다 높고 폐식용유(WCO, waste cooking oil)의 18 mg-KOH/g 보다는 낮다. 요오드가는 대두유 128 ~ 143 g-I/100g 보다 낮고 팜유의 48 ~ 58 g-I/100g 보다는 높은 수준이다.

이로부터 곤충 지질은 대두유보다 포화지방산 함량이 높음을 알 수 있다. 이러한 특성들로부터 생산된 바이오디젤의 연료 특성을 짐작할 수 있다. 또한, 지질의 높은 자유지방산 함량은 바이오디젤로의 전환을 어렵게 한다.

동애등애 지질과 식물성 유지의 지방산 조성을 Table 3에 나타내었다. 기존의 식물성 유지는 주로 팜익산(C_{16:0}, palmitic acid), 올레익산(C_{18:1}, oleic acid), 리놀레익산(C_{18:2}, linoleic acid)로 이루어져 있다. 동애등애 지질은 라우릭산(C_{12:0}, lauric acid), 팜익산, 올레익산, 리놀레익산 등의 10종 이상의 지방산으로 이루어져있으며 탄소수는 10에서 22로 분포하고 있다. 곤충 지질에는 일반적으로 바이오디젤의 원료로 쓰이는 대두유, 팜유에 비해 라우릭산의 함량이 많다[1, 8, 16].

Table 2. Physical and chemical properties of grease of BSF

| Biomass | Iodine value (g-I/100g) | Acid value (mg-KOH/g) | Saponification value (mg-KOH/g) | Melt point (°C) | Peroxide value (meq/kg) | Ref. |
|----------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------|-------------------------|------|
| BSF | 96 | 8.7 | 157.5 | 5 | 0.03 | 1 |
| | 89 | 8.2 | 157 | 6.8(CP) | 0.18 | 9 |
| | 89.7 | 7.1 | 146.6 | 4 | 0.04 | 16 |
| | 76.5 | 11.1 | 232.4 | - | - | 15 |
| Soybean | 128-143 | 0.2 | 195.3 | - | - | 17 |
| Palm | 48-58 | 0.1 | 208.63 | - | - | 17 |
| WCO | 148 | 18 | - | - | - | 18 |
| Rapeseed | 94-120 | 0.2 | 168-187 | - | - | 19 |
| Jatropha | 108.4 | 5.4 | 196.3 | - | - | 17 |

Table 3. The fatty acid composition of grease BSF

| Biomass | Fatty acids(%) | | | | | | | | | | | | | | Ref. |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|
| | C _{10:0} | C _{12:0} | C _{14:0} | C _{15:0} | C _{16:0} | C _{16:1} | C _{17:0} | C _{18:0} | C _{18:1} | C _{18:2} | C _{18:3} | C _{19:0} | C _{20:0} | C _{20:1} | |
| BSF | 3.1 | 35.6 | 7.6 | 1.0 | 14.8 | 3.8 | - | 3.6 | 23.6 | 2.1 | - | - | - | - | 1 |
| | - | 44.9 | 8.3 | - | 13.5 | 2.4 | - | 2.1 | 12.0 | 9.9 | - | - | - | - | 8 |
| | 3.8 | 27.8 | 8.1 | 1.5 | 14.2 | 4.5 | - | 7.6 | 22.5 | 1.8 | - | - | - | - | 9 |
| | 2.8 | 30.5 | 7.7 | - | 21.4 | 4.3 | - | 3.2 | 24.9 | 4.3 | 8.2 | 0.9 | - | - | 12 |
| | 1.4 | 41.2 | 0.4 | 0.1 | 12.2 | 3.2 | 0.2 | 2.4 | 14.1 | 13.8 | - | - | 0.1 | - | 20 |
| Soybean | - | - | 0.5 | - | 10.0 | - | - | 6.0 | 20.2 | 53.7 | 8.1 | 0.7 | - | - | 17 |
| Palm | - | - | 2.0 | - | 48.0 | - | - | 5.0 | 37.0 | 9.1 | 1.1 | - | - | - | 17 |
| WCO | - | - | 1.4 | - | 13.9 | - | - | 5.7 | 33.6 | 37.9 | 4.9 | - | 0.7 | 0.3 | 17 |
| Rapeseed | - | - | - | - | 4.9 | - | - | 1.6 | 33.0 | 20.4 | 7.4 | - | - | - | 17 |
| Jatropha | - | - | 0.1 | - | 14.2 | 0.7 | 0.1 | 7.0 | 44.7 | 32.8 | 0.2 | - | 0.2 | - | 17 |

곤충 지질의 라우릭산에서 팜익산까지의 지방산은 약 64%로 대두유 11%, 팜유 50%에 비해 높다. 이러한 특성은 곤충 유래 바이오디젤의 인화점, 동점도, 밀도에 영향을 준다.

2.3. 바이오디젤 합성 방법

바이오디젤은 지질과 메탄올을 촉매 반응시켜 합성한다. 적용되는 촉매는 곤충 지질의 자유지방산 함량에 의해 결정된다. Leung 등은 염기촉매를 사용할 수 있는 지질의 자유지방산 함량을 2.5 wt% 이하로 제시하였다. 그 이상에서는 자유지방산의 비누화에 의해 바이오디젤의 분리가 어려워지기 때문이다. 지질에 포함된 자유지방산 함량이 2.5 wt% 이상인 경우에는 산촉매를 사용하여 에스테르화 반응을 시키거나 염기촉매를 사용하려면 전처리 공정을 필요로 한다[21].

지질에 포함된 자유지방산, 트리글리세라이드

(TG, triglyceride)에 따는 반응공정을 Fig. 2에 나타내었고 Table 4와 5에서 산과 염기촉매에 따른 반응식과 장·단점을 나타내었다. 염기촉매를 사용하는 전이에스테르화 반응은 반응시간이 짧지만 지질에 포함된 자유지방산을 비누화시켜 바이오디젤 회수공정에서 층분리를 어렵게 한다. 반면에 산촉매는 주로 자유지방산을 전환시키며 장시간, 고온에서 트리글리세라이드도 FAME(fatty acid methyl ester)로 전환시킬 수 있다. 이러한 이유에서 상용 공정에서는 주로 저산가 원료를 이용하여 반응시간이 짧은 염기촉매를 사용한다.

동해등에 지질은 자유지방산 함량이 낮아 전이에스테르화 반응을 시켰으며 일반적으로 알칼리 촉매인 KOH, NaOH를 주로 사용한다. 알칼리 촉매의 비활성화 때문에 대부분의 자유지방산은 증류를 통해 제거하거나 산촉매로 에스테르화 반응을 시킨다.

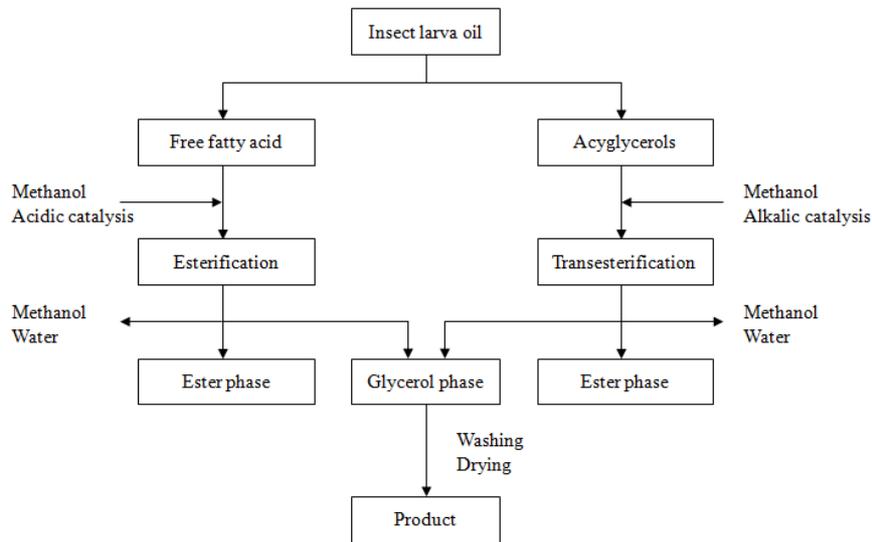


Fig. 2. Process diagram for biodiesel production.

Table 4. Reaction properties of alkali and acid catalyst

| | Alkali catalyst | Acid catalyst |
|-------------|---|---------------|
| Type of oil | < 2.5% FFA | > 2.5% FFA |
| FFA | Soap formation | → FAME |
| TG | → FAME | → FAME |
| Reactivity | Fast | Slow |
| Water | Triglyceride + H ₂ O → Diglyceride + Free fatty acid | |
| Temperature | Lower | Higher |
| Time | Short | Long |

Table 5. Reaction equation for biodiesel production

| Alkali catalyst | Acid catalyst |
|---|---|
| $ \begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-O-CO-R}_1 \\ \\ \text{CH-O-CO-R}_2 \\ \\ \text{CH}_2\text{-O-CO-R}_3 \end{array} + 3\text{ROH} \longrightarrow \begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-OH} \\ \\ \text{CH-OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{-OH} \end{array} + \begin{array}{c} \text{R-O-CO-R}_1 \\ \text{R-O-CO-R}_2 \\ \text{R-O-CO-R}_3 \end{array} $ <p style="text-align: center;">Transesterification reaction</p> | $ \text{R}_1\text{-COOH} + \text{ROH} \longrightarrow \text{R-O-CO-R}_1 + \text{H}_2\text{O} $ <p style="text-align: center;">Esterification reaction</p> |
| $ \text{R}_1\text{-COOH} + \text{NaOH} \longrightarrow \text{R}_1\text{COONa} + \text{H}_2\text{O} $ <p style="text-align: center;">Saponification reaction</p> | $ \begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-O-CO-R}_1 \\ \\ \text{CH-O-CO-R}_2 \\ \\ \text{CH}_2\text{-O-CO-R}_3 \end{array} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-OH} \\ \\ \text{CH-O-CO-R}_2 \\ \\ \text{CH}_2\text{-O-CO-R}_3 \end{array} + \text{R}_1\text{-COOH} $ <p style="text-align: center;">Hydrolysis reaction</p> |

알칼리 촉매를 사용한 전이에스테르화 반응은 가장 경제적인 바이오디젤 전환 반응이다. 알칼리 촉매를 사용한 동에등에 지질의 전이에스테르화 반응은 지질 대비 메탄올을 1:6 정도로 과량 첨가하고 촉매는 1% 내외를 사용한다. 40 ~ 65 °C의 반응 온도에서 1 hr 이내에서 반응한다. 반응 완료 후에 생성물은 냉각되고 층분리된다. 밀도가 큰 글리세롤 층은 30 min 정도가 지나면 층분리가 확실히 나타난다. 과량의 메탄올은 감압 증류를 통해 제거되고 재사용된다. 이를 제거한 후에 상층은 증류수로 세척하고 수분을 제거하면 99% 이상의 FAME 함량을 얻을 수 있다[9-12, 22].

자유지방산 함량이 높은 고산가 원료는 바이오디젤의 수율을 높이기 위해 2단 반응을 실시하기도 한다. 지질에 포함된 자유지방산은 산촉매를 통해 에스테르화 반응을 미리 진행하고 글리세라이드는 염기촉매를 사용하여 전이에스테르화 반응을 시킨다. Li 등은 2단 반응에서 추출된 지질을 약 73 °C까지 가열하고 메탄올과 지질을 8:1로 혼합하여 1%의 황산을 촉매로 하여 반응하였다. 반응은 2 hr 동안 진행하였고 반응이 완료된 후에는 물을 혼합하여 물 층과 바이오디젤 층을 분리하였다. 하층은 물, 글리세린, 황산이 포함되고 상층은 바이오디젤, 지질이 포함된다. 상층은 다시 메탄올과 1:8의 비율로 혼합하고 0.8%의 NaOH를 촉매로 하여 65 °C에서 30 min 동안 교반하면서 전이에스테르화 반응을 실

시하였다. 글리세린과 메탄올은 제거되고 바이오디젤은 80 °C의 증류수로 세척하였다[1].

곤충 지질을 이용한 바이오디젤 생산에서 산촉매를 사용한 경우에는 과량의 메탄올과 높은 반응 온도에서 장시간 합성하게 된다. 반면에 염기촉매를 사용한 경우에는 상대적으로 적은 메탄올과 40 ~ 60 °C의 낮은 반응 온도에서 1 hr 내외의 짧은 시간 동안 반응한다. 곤충 지질 유래 바이오디젤 합성에서 반응 온도, 반응 시간이 짧은 염기촉매를 사용하였고 FFA 함량을 최소화하여 후처리 공정을 보다 쉽게 하였다.

3. 곤충 유래 바이오디젤의 연료 특성

곤충 지질 유래 바이오디젤의 FAME 함량과 성분은 EN14103 시험방법을 통해 가스크로마토그래피로 분석되고 대두유, 팜유 유래 바이오디젤 등과 비교하였다.

Table 6에서 동에등에 지질 유래 바이오디젤은 C_{10:0}에서 C_{19:0}까지의 지방산 메틸에스테르로 이루어졌으며 C_{12:0} FAME(lauric acid methyl ester)의 함량이 가장 높고 C_{18:1}, C_{16:0} FAME 순이다. 이는 동에등에 지질의 지방산 조성과 일치한다. 또한, C_{12:0} FAME 이하의 중간 길이를 갖는 FAME 함량이 대두유, 팜유 유래 바이오디젤보다 높다. 이러한 중간 길이의 FAME 함량이 높은 경우에는 인화점이 낮다.

Table 6. The fatty acid composition of BSF biodiesel

| | Fatty acid methyl ester(%) | | | | | | | | | | | | | | | Ref |
|----------|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----|
| | C _{10:0} | C _{12:0} | C _{14:0} | C _{15:0} | C _{16:0} | C _{16:1} | C _{18:0} | C _{18:1} | C _{18:2} | C _{18:3} | C _{19:0} | C _{20:0} | C _{20:1} | C _{22:0} | C _{22:1} | |
| BSF | 3.8 | 27.8 | 8.1 | 1.5 | 14.2 | 4.5 | 7.6 | 22.5 | 1.8 | - | - | - | - | - | - | 9 |
| | 2.8 | 30.5 | 7.7 | - | 21.4 | 4.3 | 3.2 | 24.9 | 4.3 | - | 0.9 | - | - | - | - | 12 |
| | 3.1 | 35.6 | 7.6 | - | 14.8 | 3.8 | 3.6 | 23.6 | 5.8 | - | 1.4 | - | - | - | - | 23 |
| | 1.6 | 43.2 | 7.0 | - | 19.7 | 2.8 | 5.5 | 13.0 | 2.3 | - | 4.7 | - | - | - | - | 20 |
| Soybean | - | 0.1 | 0.1 | - | 11.6 | 0.2 | 3.9 | 23.7 | 53.8 | 5.9 | - | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | 24 |
| Palm | 0.5 | 0.3 | 1.1 | - | 42.5 | 0.2 | 4.2 | 41.3 | 9.5 | 0.3 | - | - | - | 0.1 | - | 24 |
| WCO | - | - | 1.2 | - | 36.9 | | 6.7 | 31.6 | 18.9 | - | - | 0.7 | 0.3 | 0.3 | - | 16 |
| Rapeseed | 0.6 | 0.1 | - | - | 4.2 | 0.1 | 1.6 | 59.5 | 21.5 | 8.4 | - | 0.4 | 2.1 | 0.3 | 0.5 | 24 |
| Jatropha | - | - | - | - | 13.8 | 1.0 | 6.3 | 42.6 | 26.4 | 0.1 | - | - | - | - | - | 25 |

Table 7. Saturated and unsaturated FAME properties of grease of BSF

| Biomass | Saturated FAME | Monounsaturated FAME | Polyunsaturated FAME | Ref. |
|----------|----------------|----------------------|----------------------|------|
| BSF | 69.9 | 14.9 | 12.5 | 8 |
| | 57.39 | 28.99 | 12.67 | 26 |
| | 57.81 | 17.54 | 13.82 | 20 |
| | 65.7 | 30.2 | 2.1 | 1 |
| | 65.6 | 30.1 | 4.3 | 12 |
| Soybean | 15.5 | 23.5 | 61.0 | 27 |
| Palm | 43.4 | 43.4 | 13.2 | 27 |
| WCO | 46.0 | 31.9 | 18.9 | 16 |
| Rapeseed | 7.4 | 62.3 | 30.0 | 17 |
| Jatropha | 21.1 | 44.5 | 34.4 | 17 |

바이오디젤의 포화, 불포화 지방산 비율은 연료의 산화안정도와 저온 유동성과 관련이 있다. Table 7에 원료별 바이오디젤의 포화, 불포화 함량을 나타내었다. 곤충 유래 바이오디젤의 포화지방산은 약 57 ~ 70% 정도로 불포화지방산에 비해 높다. 곤충 유래 바이오디젤은 대두유, 팜유의 포화지방산 함량인 15.5%, 43.4%에 비해 높다. 지방산 조성은 바이오디젤 품질을 결정하는 중요한 인자이다. 탄소수가 많은 포화지방산으로부터 생산된 바이오디젤은 저온 유동성이 좋지 않다. 반면에 다불포화지방산(PUFA, polyunsaturated fatty acids)으로부터 생산된 바이오디젤은 산화안정도가 좋지 않아 낮은 저장안정성을 나타낸다

[28, 29]. 따라서 포화지방산 함량이 많고 다불포화지방산이 낮은 곤충 지질은 품질 특성이 좋은 바이오디젤을 만들 수 있다.

바이오디젤은 다양한 원료로부터 생산되며 에너지안보, 배출가스, 연료 안정성의 이점이 있는 자동차연료로 사용이 가능하다. EN14214 품질기준을 바탕으로 곤충 유래 바이오디젤의 품질 특성을 Table 8에 나타내었다.

바이오디젤의 연료 특성은 정제 능력에 따라 크게 영향을 받는다. 메탄올, 수분, 전산가 등은 직접적으로 연관이 있으며 밀도, 동점도, 인화점 등은 간접적으로 영향을 받는다. 메탄올 함량이 높으면 밀도, 동점도, 인화점 등이 낮아질 수 있

Table 8. Analysis data of the quality of biodiesel from the BSF grease

| Properties | BSF | | Soybean | Palm | WCO | Rapeseed | Jatropha |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
| | Ref. 12 | Ref. 23 | Ref. 18 | Ref. 18 | Ref. 30 | Ref. 24 | Ref. 25 |
| Ester content, wt% | 98.3 | 97.2 | 98.2 | 97.68 | - | - | - |
| Sulfur, mg/kg | 1200 | N.D. | 0.7 | 1.1 | - | 4 | 30 |
| Density @ 15 °C, kg/m ³ | 875 | 885 | 886 | 876 | 874.2 | 879 | 886 |
| Viscosity @ 40 °C, cSt | 5.2 | 5.8 | 4.03 | 4.53 | 4.65 | 4.5 | 3.89 |
| Flash Point, °C | 121 | 123 | 177 | 171 | 453 | 169 | 459 |
| Water, wt% | 0.03 | 0.03 | 0.013 | 0.027 | 0.08 | - | 0.017 |
| Acid value, mg KOH/g | <0.8 | 1.1 | 0.24 | 0.3 | 1.17 | - | 0.154 |
| CFPP, °C | - | - | -3.0 | >10 | - | -12 | - |
| Methanol, wt% | - | 0.3 | N.D. | N.D. | - | - | 0.2 |

Table 9. Composition of BSF with other biodiesel feedstocks[2].

| Feedstocks | Oil contents (% oil by wt. in dry biomass) | Oil yield (L oil/ha/year) | Biodiesel productivity (kg biodiesel/ha/year) |
|------------|---|------------------------------|--|
| Soybean | 18 | 636 | 562 |
| Rapeseed | 41 | 974 | 862 |
| Palm | 36 | 5,366 | 4,747 |
| Jatropha | 28 | 741 | 656 |
| Microalgae | 50 | 97,800 | 86,515 |
| BSF | 40 | 162,000 | 145,800 |

다. 수분, 전산가, 메탄올 등은 정제를 통해 쉽게 함량을 낮출 수 있다. 동애등에 유래 바이오디젤의 연료 특성은 유채유 유래 바이오디젤과 유사하다. 동애등에 유래 바이오디젤들의 밀도, 수분 함량, 동점도, 인화점 등의 연료 품질은 거의 유사한 특성을 보인다. 그러나, 황 함량은 품질기준에 비해 높은 경향을 나타내었다. 이는 촉매로 황산을 사용하고 남아있는 황분에 의한 것으로 수세를 통해 낮출 수 있다. 또한, 수세를 통해 제거되지 않고 남아 있는 황분은 고비점의 화합물로 존재하여 증류를 통해 제거가 가능하다[12].

바이오디젤 품질기준인 EN14214의 전 항목을 분석한 예는 없지만 대부분의 연구들이 바이오디젤의 연료 품질에 영향을 줄 수 있는 주요 항목을 대상으로 이루어졌다. 기존의 동·식물성 유래 바이오디젤과 큰 차이를 보이지 않아 바이오디젤 원료로 곤충 지질의 사용 가능성을 확인할 수 있었다.

4. 곤충 유래 바이오디젤의 생산성

Table 9에서 기존의 식물성 바이오디젤 원료는 넓은 재배면적과 긴 재배 시간으로 연간 단위면적당 지질 생산 수율이 낮고 그 중에서 동남아시아에서 주로 생산하는 팜이 가장 높은 지질 생산 수율을 나타낸다. 미세조류는 높은 지질 함량과 짧은 재배 시간, 이산화탄소 활용으로 높은 지질 생산 수율을 보이지만 배양, 수거, 수분제거, 추출 등의 문제로 아직까지 상용화까지 이르지 못하고 있다.

곤충(동애등에)으로부터 생산된 바이오디젤은 국내 곤충 사육 조건을 적용하여 계산하였다. 동애등에는 음식물쓰레기를 먹이로 하여 m² 당 25,000 마리를 14일 동안 사육하였다. 14일이 지난 후에 유충의 무게는 m² 당 약 5 kg까지 성장하고 지질은 기계식 방법으로 압착하여 40% 정도까지 추출된다. 이를 연간 단위면적당 생산되는

지질의 양으로 계산하면 약 162,000 L oil/ha/year에 해당한다. Table 9에서 바이오디젤 원료에 따른 지질 함량을 건조 중량으로 나타냈으며 동애등에는 약 40%의 지질을 포함하고 있다. 팜유의 연간 단위면적당 생산되는 지질 수율은 5,366 L oil/ha/year으로 식물성 원료로서는 가장 높다. 미세조류는 97,800 L oil/ha/year으로 팜유에 비해 약 20배 정도 높다. 동애등에는 지질 함량이 높고 단위면적당 성장하는 유층의 무게가 다른 원료에 비해 높다. 또한, 성장 기간도 매우 짧다. 동애등의 지질 수율은 기존의 팜유에 비해 30배 이상 높고 미세조류에 비해 1.5배 높다. 이렇게 다른 원료에 비해 높은 바이오디젤 생산성은 곤충 지질이 바이오디젤 원료로서 가능성을 갖고 있다고 하겠다. 또한, 음식물쓰레기를 먹이원으로 하기 때문에 환경문제를 해결할 수 있고 국내 생산이 가능한 장점을 갖고 있다.

5. 결론

국내에서 바이오디젤은 경유에 3% 혼합되어 사용되고 있으며 팜유 계열을 위주로 약 60%를 수입에 의존하고 있다. 곤충은 지질 함량이 높다. 특히, 동애등에는 음식물쓰레기를 먹이로 하여 환경문제까지 해결할 수 있는 대안이다. 일반적인 바이오디젤 합성 방법에서 산촉매는 자유지방산 함량이 높은 고산가 원료에 사용된다. 염기촉매는 반응이 빠르지만 자유지방산과 반응하여 비누화(soap)를 형성하기 때문에 산가가 낮은 원료에 사용된다. 동애등에 지질은 자유지방산 함량이 낮아 염기촉매를 사용한다. 동애등에 지질은 라우릭산(C_{12:0}) 함량과 포화지방산 함량이 높고 다불포화지방산 함량이 낮아 대두유, 팜유에 비해 인화점이 낮고 산화안정도가 높아 저장안정성이 높다. 곤충 유래 바이오디젤은 대부분의 품질지표를 만족하였다. 곤충은 지질 함량이 약 40%로 기존의 동·식물성 원료에 비해 높다. 또한, 생육기간이 짧고 사육면적이 작아 단위면적당 지질 수율이 팜유에 비해 30배 높고 미세조류보다 1.5배 높아 바이오디젤의 국내 원료로서 가능성이 높다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 농생명산업기술개발(제 농축2018-58호)에서 지원받았습니다.

References

1. Q. A. Li, L. Zheng, N. Qiu, H. Cai, J. K. Tomberlin, Z. Yu, "Bioconversion of Dairy Manure by Black Soldier Fly(Diptera: Stratiomyidae) for Biodiesel and Sugar Production", *Water Management*, Vol.31, pp. 1316-1320, (2011).
2. A. L. Ahmad, N. H. Yasin, C. J. C. Derek, J. K. Lim, "Microalgae as a Sustainable Energy Source for Biodiesel Production: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, pp. 584-593, (2011).
3. S. N. Gebremariam, J. M. Marchetti, "Economics of Biodiesel Production: Review", *Energy conversion and Management*, Vol.168, pp. 74-84, (2018).
4. J. Y. Park, J. K. Kim, C. K. Park. "A Review of Biofuels Production Technologies from Microalgae", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol.27, pp. 368-403. (2016).
5. J. Y. Park, J. K. Kim, H. S. Im, "A Review on Fuel Properties and Liquid Biofuels Production Technologies from Sewage Sludge", *Journal of Oil & Applied Science*, Vol.35, pp. 540-559, (2018).
6. J. K. Kim, J. Y. Park, C. H. Jeon, K. I. Min, E. S. Yim, C. S. Jung, J. H. Lee, "Fuel Properties of Various Biodiesels Derived Vegetable Oil", *Journal of Oil & Applied Science*, Vol.30 pp. 35-48, (2013).
7. A. E. Atabani, A. S. Silitonga, I. A. Badruddin, T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki, S. Mekhilef, "A Comprehensive Review on Biodiesel as an Alternative Energy Resource and its Characteristics", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.16, pp. 2070-2093, (2012).
8. K. C. Surendra, R. Olivier, K. K. Tomberlin, R. Jha, "Bioconversion of Organic Wastes into Biodiesel and Animal

- Feed via Insect Farming”, *Renewable Energy*, Vol.98, pp. 197–202, (2016).
9. L. Zheng, Y. Hou, W. Li, S. Yang, Q. Li, Z. Yu, “Biodiesel Production from Rice Straw and Restaurant Waste Employing Black Soldier Fly Assisted by Microbes”, *Energy*, Vol.47, pp. 225–229, (2012).
 10. C. Zi-Zhe, Y. De-po, W. Sheng-qing, W. Yong, M. J. T. Reaney, Z. Zhi-min, Z. Long-ping, S. Guo, N. Yi, Z. Dong, N. Hui-ran, Y. Wen-zhe, “Conversion of Poultry Manure to Biodiesel, a Practical Method of Producing Fatty Acid Methyl Esters via Housefly(*Musca domestica* L.) Larval Lipid”, *Fuel*, Vol.210, pp. 463–471, (2017).
 11. F. M. Agugliaro, M. J. S. Muros, F. G. Barroso, A. M. Sanchez, S. Rojo, “Insects for Biodiesel Production”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.16, pp. 3744–3753, (2012).
 12. H. C. Nguyen, S. H. Liang, S. Y. Li, C. H. Su, C. C. Chein, D. T. M. Huong, “Direct Transesterification of Black Soldier Fly Larvae(*Hermetia illucens*) for Biodiesel Production”, *Journal of the Taiwan Institute Chemical Engineers*, Vol.85, pp. 165–169, (2018).
 13. M. Balat, H. Balat, “Progress in Biodiesel Processing”, *Applied Energy*, Vol.87, pp. 1815–1835, (2010).
 14. J-Y. Lee, C. Yoo, S-Y. Jun, C-Y. Ahn, H-M. Oh, “Comparison of Several Methods for Effective Lipid Extraction from Microalgae”, *Bioresource Technology*, Vol.101, pp. 575–577, (2010).
 15. H. C. Nguyen, S. H. Liang, S. S. Chen, C. H. Su, J. H. Lin, “Enzymatic Production of Biodiesel from Insect Fat Using Methyl Acetate as an Acyl Acceptor: Optimization by Using Response Surface Methodology”, *Energy Conversion and Management*, Vol.158, pp. 168–175, (2018).
 16. P. Verma, M. P. Sharma, “Review of Process Parameters for Biodiesel Production from Different Feedstocks”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.62, pp. 1063–1070, (2016).
 17. A. Jarmakar, S. Karmakar, S. Mukherjee, “Properties of Various Plants and Animals Feedstocks for Biodiesel Production”, *Bioresource Technology*, Vol.101, pp. 7201–7210, (2010).
 18. S. P. Singh, D. Singh, “Biodiesel Production through the Use of Different Sources and Characterization of Oils and their Esters as the Substitute of Diesel: a Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.14, pp. 200–216, (2009).
 19. I. Ambat, V. Srivastava, M. Sillanpaa, “Recent Advancement in Biodiesel Production Methodologies Using Various Feedstock: A Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.90, pp. 356–369, (2018).
 20. R. Salomone, G. Saija, G. Mondello, A. Giannetto, S. Fasulo, D. Savastano, “Environmental Impact of Food Waste Bioconversion by Insects: Application of Life Cycle Assessment to Process Using *Hermetia Illucens*”, *Journal of Cleaner Production*, Vol.140, pp. 890–905, (2017).
 21. D. Y. C. Leung, X. Wu, M. K. H. Leung, “A Review on Biodiesel Production Using Catalyzed Transesterification”, *Applied Energy*, Vol.87, pp. 1083–1095, (2010).
 22. L. T. Thanh, K. Okitsu, L. V. Boi, Y. Maeda, “Catalytic Technologies for Biodiesel Fuel Production and Utilization of Glycerol: A Review”, *Catalysts*, Vol.2, pp. 191–222, (2012).
 23. Q. Li, L. Zheng, H. Cai, E. Garza, Z. Yu, S. Zhou, “From Organic Waste to Biodiesel: Black Soldier Fly, *Hermetia Illucens*, Makes it Feasible”, *Fuel*, Vol.90, pp. 1545–1548, (2011).
 24. S. K. Hoekman, A. Broch, C. Robbins, E. Cenicerros, M. Natarajan, “Review of Biodiesel Composition, Properties, and Specifications”, *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews*, Vol.16, pp. 143-169, (2012).
25. X. Deng, Z. Fang, Y. Liu, C. Yu, "Production of Biodiesel from Jatropha Oil Catalyzed by Nanosized Solid Basic Catalyst", *Energy*, Vol.32, pp. 777-784, (2011).
 26. C. Wang, L. Qian, W. Wang, T. Wang, Z. Deng, F. Yang, J. Xiong, W. Feng, "Exploring the Potential of Lipids from Black Soldier Fly: New Paradigm for Biodiesel Production(1)", *Renewable Energy*, Vol.111, pp. 749-756, (2017).
 27. R. Sarin, M. Sharma, S. Sinharay, R. K. Malhotra, "Jatropha-Palm Biodiesel Blends: an Optimum Mix for Asia", *Fuel*, Vol.86, pp. 1365-1371, (2007).
 28. M. J. Haas, "Improving the Economics of Biodiesel Production through the Use of Low Value Lipids as Feedstocks: Vegetable Oil Soapstock", *Fuel Process Technology*, Vol.86, pp. 1087-1096, (2005).
 29. A. S. Ramadhas, S. Jayaraj, C. Muraleedhaaran, "Biodiesel Production from High FFA Rubber Seed Oil", *Fuel*, Vol.84, pp. 335-340, (2005).
 30. P. Zareh, A. A. Zare, B. Ghobadian, "Comparative Assessment of Performance and Emission Characteristics of Castor, Coconut and Waste Cooking Based Biodiesel as Fuel in a Diesel Engine", *Energy*, Vol.139, pp. 883-894, (2017).