

## 과제계획요청서

### PROJECT PROPOSAL REQUEST (PPR)

바이오매스 우회 길을 여는 열쇠 미생물  
(Beyond Biomass: Beyond Biomass, Microbes)

PPR No. ASTRA02\_2403PPR1

공모유형: 분야공모

보안과제여부: 일반



과학기술정보통신부



한국연구재단

한계도전전략센터

Advanced Science & Technology Research Agency (ASTRA)

## 1. 과제 개요

한국연구재단 한계도전전략센터에서는 Biomass Sugar<sup>1)</sup>와 같은 지속 가능한 Biorefinery 업스트림 원료(Sustainable Upstream Feedstocks)를 상온, 상압의 조건에서 안정적이고 경제적으로 생산할 수 있는 기술 개발 (Beyond Biomass<sup>2)</sup>) 프로젝트를 추진합니다.

이 프로젝트는 “바이오매스<sup>3)</sup>가 없어도 지속 가능한 Biorefinery 원료를 효율적으로 생산할 수 있을까?” 라는 한계 도전적 문제 인식에서 출발합니다. 이 문제의 해결을 통해 지역적 한계를 극복하고, 필요 현장에서 바로 생산 가능하며, 근본적으로 지구환경 및 농업적 기반이나 경쟁력이 부족한 우리나라도 Biorefinery 업스트림 원료를 안정적으로 확보할 수 있게 된다고 판단합니다.

이 시도가 성공한다면 낮은 성장 속도, 지역적으로 편중된 생산, 식용 작물 사용에 대한 윤리적·사회적 문제, 과도한 경작에 따른 물 및 토지 사용 증가, 화학 비료 사용에 따른 환경오염 등 우리가 지금까지 당연하다고 생각한 바이오매스 출발 기술이 갖는 원천적 문제를 극복하는 계기가 될 것입니다. 그리고, 그 과정에서 얻는 새로운 지식과 경험은 합성생물학, 대사공학, 효소단백질 공학 등의 분야에서 한국의 연구 수준을 글로벌 선단 그룹으로 인식시킬 것입니다.

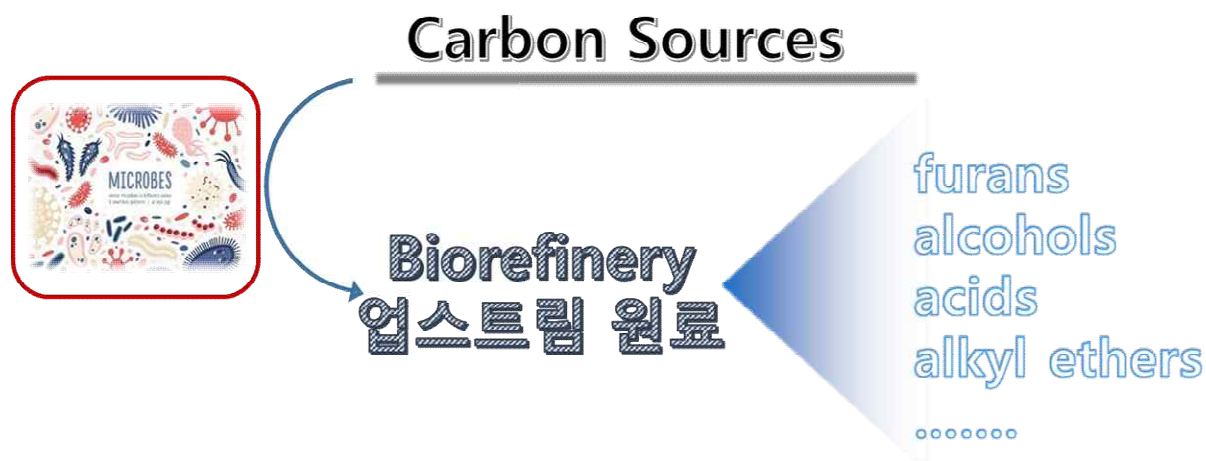


그림 1. 프로젝트(Beyond Biomass)에 대한 설명도

- 1) 글루코스 및 수크로스와 같은 각종 단당류(Monosaccharides)와 이당류(Disaccharides)를 지칭함.  
바이오매스의 복잡한 전처리와 가수분해를 거쳐 얻어지며, 플라스틱, 나일론, 폴리에스터 및 고분자 제조용 전구체(Furan, Acid, Ether 등)를 생산할 수 있는 친환경 화이트 바이오산업의 중요한 업스트림 원료 물질임.
- 2) Beyond Biomass: Beyond Biomass, Microbes
- 3) 태양광을 받아서 자라는 육상·해양 식물자원, 생태계 순환과정을 구성하는 생물(Bio)의 총 덩어리(Mass).

## 2. 추진 배경

우리나라는 바이오 기반 산업 활성화를 목표로 정책적 지원을 계속하고 있고, 지속해서 강화될 글로벌 친환경 정책과 사회적 요구를 국내 화학기업들은 산업 전환의 기회로 판단하고 있습니다. 이러한 동향은 우리나라뿐 아니라 전 세계 각국에서도 쉽게 찾을 수 있습니다. 그러나, 원료 측면에서 바이오매스는 석유 기반 화학 원료 대비 높은 가격을 형성하고 있어, 화이트 바이오산업 발전의 가장 큰 장애 요인입니다. 따라서, 업스트림 원료와 이를 이용한 다양한 중간체의 안정한 수급 체계가 해당 산업의 경쟁력에 주는 영향은 매우 크고 중요합니다. 일 예로 석유화학산업의 나프타와 경질 올레핀을 들 수 있습니다. 나프타는 원유의 정제를 거쳐 얻어지는 20% 내외의 탄화수소로서 크래킹 공정을 통해 각종 경질 올레핀을 생산할 수 있습니다. 우리나라는 석유 한 방울 나오지 않는 여건에서도, 원유의 안정적 수급 시스템을 통해 석유화학산업을 세계 4위의 생산 규모와 국가주력산업으로 성장시킬 수 있었습니다.

글루코스, 슈크로스과 같은 Sugar는 식량자원의 주원료일 뿐만 아니라 바이오매스 자원에서 얻어지는 업스트림 핵심 원료입니다. 그러나, 각종 바이오매스는 첨단 종자 개량과 최신 방제 기술의 발전에도 불구하고 전통적 방식에 의해 생산되기 때문에, 기후와 토양/해양 여건에 따른 생산량의 차이<sup>4)</sup>와 생산성 한계가 전 지구의 지역에 따라 뚜렷합니다. 또한, 특정 연도의 이상기후, 글로벌 지정학적 이슈, Pandemic 등에 따른 물류 대란의 발생은 가격폭등과 수급 변동성을 초래하여 해당 산업 경쟁력에 심각한 위협 요인이 됩니다.(아래 그림2, 3 참조)<sup>5)6)</sup> 그리고, 낮은 성장 속도, 지역적으로 편중된 생산, 식용 작물을 제품 원료로 사용하는 것에 대한 거부감, 경작에 필요한 과대한 면적, 화학 비료 사용, 수질 오염 등 안정적인 산업 원료 흐름 형성 측면에서 원천적 문제가 있다고 판단합니다.

따라서, Sugar가 바이오매스 자원에서 출발하는 이상, ESG 관점의 지속 가능한 친환경 화이트 바이오산업의 성장과 확대는 자연적 한계를 갖고 있으며, 바이오매스가 없어도 Sugar와 같은 Biorefinery 업스트림 원료를 안정적

4) 특정국가 (원당-브라질, 호주, 인도, 태국 등, 전분(포도당)-미국(옥수수), 중국(옥수수), 태국 (타피오카) 등)의 공급 독점은 농경지와 기후환경 적합 여건과 이에 따른 생산량의 차이가 가져오는 하나의 예임.

5) <https://www.winton.com/news/the-sweet-and-sour-history-of-sugar-prices>

6) <https://www.farm-equipment.com/articles/5142-historical-corn-prices-provide-look-at-future-equipment-sales>

으로 생산하고자 하는 Beyond Biomass 프로젝트는 자연의 한계를 극복하는 도전적 연구라고 판단합니다.

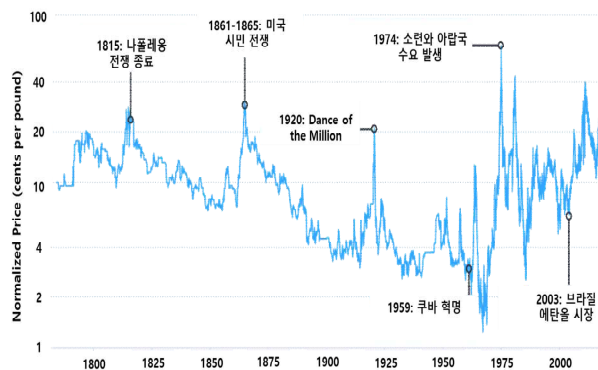


그림 2. 글로벌 이슈에 따른 Sugar 가격 변동성

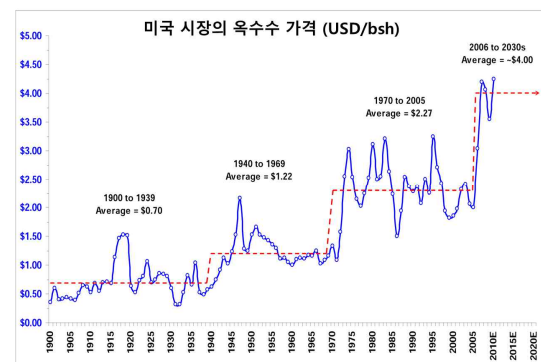


그림 3. 옥수수 가격의 역사적 변화

Biorefinery 업스트림 원료를 제조하기 위한 탄소(Carbon) 원(Source) 관점의 이산화탄소는 일 년 동안 350 Gt 이상이 독립영양생물 유기체(Autotrophic Organism)에 고정된다고 알려집니다.<sup>7)</sup> 이 중 95% 이상은 Ribulose-1,5-Bisphosphate Carboxylase-Oxygenase (Rubisco), 즉 광합성으로 알려진 Calvin-Benson-Basham (CBB) Cycle의 카르복실화 효소에 의해 바이오매스 자원에 이르는 대사경로가 시작됩니다.<sup>8)</sup> 그리고, CBB 경로 이외에 탄소를 고정하는 또 다른 독립 영양 경로(Wood-Ljungdahl Pathway, Reductive TCA Cycle, 3-HP/4-HB Pathway 등)가 알려져 있는데,<sup>9)</sup> 어떤 경로가 Beyond Biomass 프로젝트의 업스트림 원료 생산을 위해 가장 효과적일까? 라는 질문은 대사 설계 관점에서 중요한 기술 이슈입니다.

지금까지 대부분의 미생물을 이용한 이산화탄소 고정화 연구는 CBB Cycle 경로를 보유한 Cyanobacteria를 이용하여 대부분 진행되었고, 지금까지의 연구 결과를 바이오매스 기반 생산 경로와 비교해 보면 잠재적인 가능성(광 조사 시간 및 생산 면적 대비 Sugar 생산량 등)이 있음을 알 수 있습니다.<sup>10)</sup> 그러나 “1) Cyanobacteria의 낮은 생장 속도<sup>11)</sup>로 인해 이산화탄소 전

7) T. Schwander, L. Schada von Borzyskowski, S. Burgener, N. S. Cortina, T. J. Erb, A synthetic pathway for the fixation of carbon dioxide in vitro. Science 354, 900-904 (2016).

8) T. J. Erb, J. Zarzycki, A short history of RubisCO: The rise and fall of Nature's predominant CO<sub>2</sub> fixing enzyme. Curr. Opin. Biotechnol. 49, 100-107 (2018).

9) S. Santos Correa, J. Schultz, K. J. Lauersen, A. Soares Rosado, Natural carbon fixation and advances in synthetic engineering for redesigning and creating new fixation pathways. J. Adv. Res. 47, 75-92 (2023).

10) Daniel C. Ducat, J. Abraham Alveras-Rivas, Jeffrey C. Way, Palmera A. Silver, Rerouting carbon flux to enhance photosynthetic productivity. Applied and Environmental Microbiology 78, 60-2668 (2012).

환 속도가 여전히 낮다는 점, 2) 생성된 Sugar를 미생물이 대사 활동을 위해 적극적으로 다시 소비하기 때문에 전환 효율성이 떨어진다는 점, 3) 미생물의 대사를 위해 반드시 태양광이 필요하다는 점, 그리고 4) 설계해야 하는 대사 과정이 매우 복잡하다는 점”은 여전히 극복해야 할 기술한계이고, 이로 인해 경제성 확보가 요원한 상황입니다.

이산화탄소로부터 업스트림 원료를 제조하기 위한 One-Carbon 분자의 C-C Coupling 반응은 생촉매 효소 반응뿐만 아니라, 열화학 촉매반응 분야에서도 오래된 연구 주제입니다. 그러나 활성화 에너지, 수소 밸런스, 정밀한 반응 선택도 조절 이슈에 대해 아직 명확한 해결책을 제공하지 못하고 있습니다. 각종 바이오 원료 중간체 물질이 *Escherichia coli*, *Saccharomyces cerevisiae*를 비롯한 미생물에서 얻어진다는 사실에 착안하여, 비균일계 C-C Coupling 경로를 이에 도입하는 연구가 많이 시도되었습니다.<sup>12)13)</sup> 그러나, 극복하기 어려운 복잡성, 미생물 주변 환경에의 민감성과 낮은 효율성, 단일 탄소 물질 대사경로(One-Carbon Metabolic Pathway)를 완성하기 위한 Chemical Driving Force 확보가 어려운 문제로 알려집니다. 따라서, C-C Coupling 대사를 구현하는 합성생물학 플랫폼을 완성하기 위해서는 1) 적은 수의 효소를 이용한 단순 경로 구성, 2) 간섭을 받지 않는 독립된 선형 경로, 3) 열역학적으로 반응이 빨리 진행될 수 있는 Chemical Driving Force가 담보되어야 합니다.<sup>14)</sup>

C-C Coupling을 통해 3개의 One-Carbon 분자(Formaldehyde)를 1개의 Three-Carbon 분자(Dihydroxyacetone, a ketotriose monosaccharide)로 전환하는 비자연계 컴퓨터 설계 효소(Computationally Designed Enzyme, Formolase (FLS)) 경로가 제안되었습니다.<sup>15)</sup> 비록 *in vitro* 실험에 기반한 가능성을 제시한 결과이지만, 자연계 탄소 고정화 메커니즘과는 달리 간섭을 받지 않는 선형 경로이고, 산소 환경에 민감하지 않으면서 열역학적으로 유리한 간단한 몇 개의 단계로 구성되어 있습니다. 그리고, 이미 알려진 효소

11) Td=2.5~8hr vs. *E. coli* Td=20 min

12) Keasling JD, Manufacturing molecules through metabolic engineering. *Science* 330, 1355-1358 (2010).

13) Müller JEN, et al. Engineering *Escherichia coli* for methanol conversion. *Metabol Eng* 28, 190-201 (2015).

14) Bar-Even A, Noor E, Lewis NE, Milo R, Design and analysis of synthetic carbon fixation pathways. *Proc Natl Acad Sci USA* 107, 8889-8894 (2010).

15) David Baker et al, Computational protein design enables a novel one-carbon assimilation pathway. *PNAS* 112, 3704-3709 (2015).

반응 경로와 연결하면 Formate로부터 다양한 C-C Coupling 물질을 만드는 플랫폼 기술을 제공한다는 점이 매우 흥미롭습니다. 단위 Formate 소비량을 바이오매스로 환산한 수율 결과와 이에 해당하는 열역학적 Driving Force 결과를 이미 알려진 9개의 자연계 단일 탄소 분자(Formate 또는 이산화탄소) 활용 경로와 비교하였는데, (그림 4) 바이오매스 환산 수율이 rTCA Cycle보다 다소 낮지만, FLS 경로가 rTCA Cycle은 물론 다른 자연계 경로보다 열역학적으로 매우 수월한 경로라고 알려집니다.

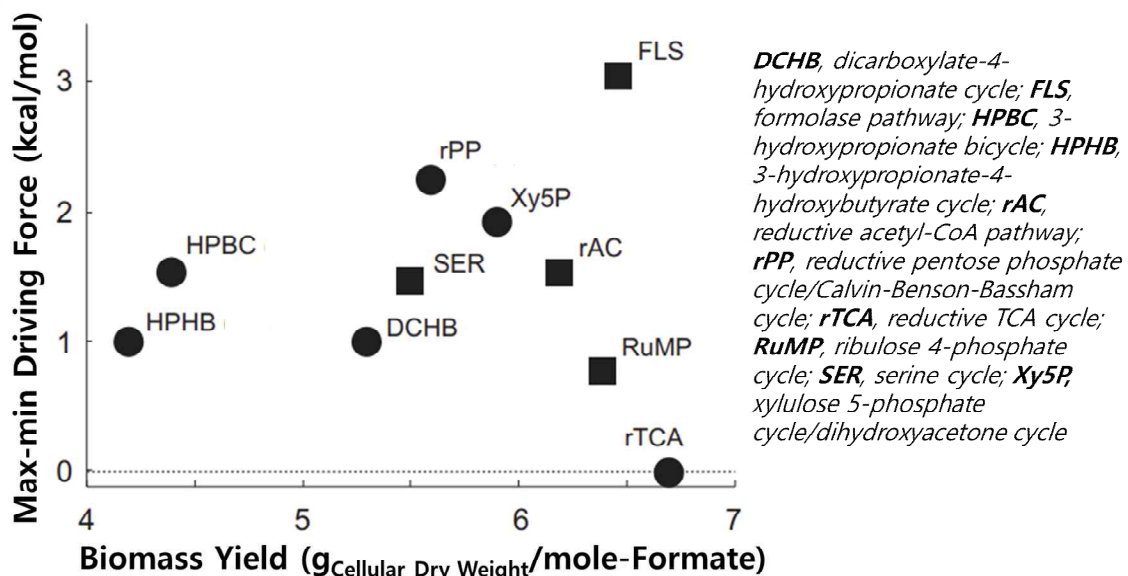


그림 4. 다양한 대사 경로의 열역학적 용이성과 탄소 활용 효율성 데이터 비교.<sup>15)</sup>

위에서 살펴본 FLS 기반 경로는 비자연계 효소 설계 관점에서, Formose 반응<sup>16)</sup>(유기 화학 기반 Formaldehyde-to-Sugar 합성)을 시도한 연구 결과입니다. 한편 이산화탄소로부터 Formaldehyde를 신재생 전기를 통해 생산하는 의미 있는 연구 결과는 아직 보고되지 않았고, Formate 제조는 다수의 연구 결과<sup>17)</sup>에서 보고되고 있습니다.

태양 에너지를 저장하면서 동시에 이산화탄소를 고정화하는 연구 사례로부터 광합성 기반 바이오 원료 생산 기술이 갖는 한계(낮은 탄소 전환 효율, 일정하지 않은 생산)를 해결하는 정보를 얻을 수 있습니다. 미국 ARPA-E 프로그램(ElectroFuel)의 예(이산화탄소를 이용한 Solar Energy to BioFuel 전환 연구)를 살펴보면, 태양광의 직접 전환 최대 효율은 5% 수준이지만 태양

16) R. Breslow R, On the mechanism of the formose reaction. Tetrahedron Lett 1, 22-26 (1959).

17) H. Li et al. Integrated electromicrobial conversion of CO<sub>2</sub> to higher alcohols. Science 335, 1596 (2012).

전지 에너지 전환 효율은 20%인 수준이라는 점에 착안하여, 수소나 전기( $e^-$ )를 이산화탄소 환원 에너지로 사용함으로써 미생물을 통해 태양에너지를 효율적으로 액체 연료화 하려는 노력이 있었습니다.<sup>18)</sup> 광합성 반응 중 후반 과정인 암반응에서 이산화탄소를 고정하는 효소인 Rubisco는 무기물인 이산화탄소의 탄소를 흡수하는 핵심적 스텝을 가능하게 하는데, 캘빈 사이클<sup>19)</sup>을 비광합성 유기체에 도입하여 빛 대신 화학 에너지로 작동케 하려는 연구는 광합성 바이오 원료 생산의 탄소전환 효율성 문제 해결 시도 중 하나입니다.<sup>20)</sup>

미생물 발효 기술을 통한 탄소 전환 효율 향상의 가장 큰 한계는 대사 과정에 사용할 수 있는 환원 등가물(Reducing Equivalents)의 공급이 제한적이라는 점입니다. 예를 들어, *S. cerevisiae* 배양균의 에탄올 생산 능력은 NAD(P)H의 가용성에 의해 제한되는 것으로 나타났습니다.<sup>21)</sup> 미생물이 외부 환원 등가물을 이용하여 탄소를 고정하고 외부에서 에너지를 사용하여 관심 있는 제품을 만드는 연구 사례는 있었지만,<sup>22)23)</sup> 아직 화이트 바이오산업의 업스트림 원료를 대규모로 생산하는 미생물 플랫폼으로 설계된 사례는 없었으며, 시스템 개발 연구로의 확장을 통해 혁신적인 카본 전환 효율성, 경제성, 생산성 향상을 기대할 수 있다고 판단합니다. 한편, 수소와 전기 중 환원 등가물로서 어떤 것이 효율적인지에 대한 논의가 많이 있고, 이는 신재생 전기 에너지 사용의 효율성 이슈와 관련이 있습니다. 가장 발전된 그린 수소 생산 수전해 기술의 경우, 이론적으로 계산된 전기 에너지량( $33.6 \text{ kWh/kg H}_2$ ) 보다 최소 48% 이상의 에너지가 더 필요( $> 50 \text{ kWh/kg H}_2$ )한 것으로 알려집니다.

---

18) <https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/electrofuels>

19) 이산화탄소가 Rubisco 효소에 의해 동화(assimilation)되는 비광합성 대사 경로

20) S. Gleizer, R. Ben-Nissan et al. Conversion of *Escherichia coli* to generate all biomass carbon from  $\text{CO}_2$ . *Cell* 179, 1255-1263 (2019).

21) Henningsen BM et al, Increasing anaerobic acetate consumption and ethanol yields in *S. cerevisiae* with NADPH-specific alcohol dehydrogenase. *Appl Env Micro* 81, 8101 (2015).

22) Liu et al, Water splitting biosynthetic system with  $\text{CO}_2$  reduction efficiencies exceeding photosynthesis. *Science* 352, 1210 (2016).

23) Guo et al, Light-driven fine chemical production in yeast biohybrids. *Science* 362, 813 (2018).

### 3. 과제 목표 및 범위

(최종 목표 및 연구내용)

본 과제계획요청서(PPR)가 제시하는 중요한 연구목표는 “태양광에 의존하지 않으면서 이산화탄소로부터 Biorefinery 업스트림 원료를 생산하는 미생물의 설계와 제조”입니다. 그리고, 새로운 대사 경로를 갖는 미생물은 아래 그림 5와 같은 Biorefinery 업스트림 원료 생산 기술(농업 생산성 한계를 극복하는 높은 Carbon Fixing Flux와 석유계 경질 올레핀 수준의 경제성을 갖는 기술) 확보에 결정적인 역할을 해야 합니다.

이후 후속 연구를 통해 *in situ*로 특정 목적 산물에 대한 다운스트림 경로(Pathway)를 해당 미생물에 추가로 도입한다면, 최종 목적 산물별 생산 플랫폼 기술을 완성할 수 있다고 판단합니다.

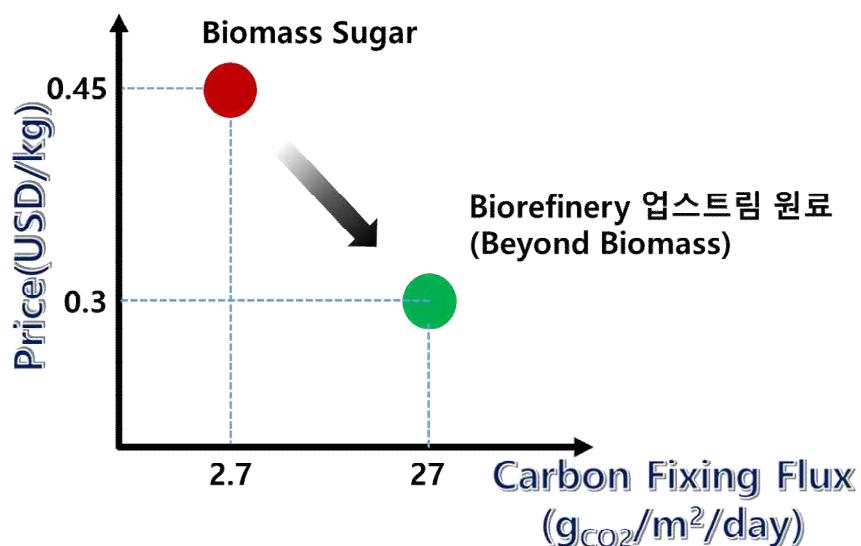


그림 5. Beyond Biomass 프로젝트의 기술 개발 방향과 목표 수준

연구개발 계획서 작성을 위해 참고할 중요한 내용은 아래와 같습니다.

- 1) 연구개발 계획서에는 연구목표와 이의 달성을 위한 연구 가설(假說)이 반드시 포함되어야 하고, 그 가설은 지금까지 알려지지 않은 것이어야 합니다. 연구 가설이 실현 가능하다는 연구 제안자의 주장은 관련 분야의 전문가들이 인정할 수 있는 과학적이고 논리적인 내용이어야 합니다. 또한, 연구 제안자는 글로벌 최선단 기술과의 비교를 통해 제안하는 가설



이 왜 혁신적이고 차별화되는 것인지 설명하여야 하고, 이를 연구 과정에서 증명하기 위한 단계별 지표를 마일스톤 이정표로 제공해야 합니다.

- 2) 연구목표는 Biorefinery 업스트림 원료 생산과정의 경제성과 Carbon Fixing Flux의 향상에 관한 내용이어야 하며, 제시하는 연구 목표가 이들과 어떠한 관계가 있고, 어떠한 영향을 주는지, 또 왜 이러한 연구목표를 설정해야 하는지 연구개발 계획서에 구체적으로 설명되어야 합니다.
- 3) Biorefinery 업스트림 원료를 제조하기 위한 출발 물질은 이산화탄소이고, 상온·상압 조건의 이산화탄소 고정화를 위해 제공되는 환원 에너지 전달체(Carrier)는 전기( $e^-$ ) 또는 수소( $H_2$ )입니다. 전기( $e^-$ ) 또는 수소( $H_2$ ) 중 연구 제안 책임자의 선택에 따라 업스트림 원료의 경제성 및 Carbon Fixing Flux에 미치는 다양한 기술적 기회 요인과 위험 요인이 동시에 수반될 것으로 예상합니다. 선택의 타당성과 예상되는 기술 위험 극복 방안을 연구목표 달성과 혁신 기술 관점에서 설명하여야 합니다.
- 4) 연구개발 계획서에는 제안하는 미생물 반응식(Balanced Stoichiometric Equation)과 이에 근거한 예상 물지 수지(Mass Balance) 값이 포함되어야 합니다.
- 5) 연구목표 달성을 위해 협력 연구<sup>24)</sup>가 필요하다면, 해당 연구의 충분한 정보(연구명, 연구내용, 수행 책임자 포함)와 명확한 역할 관계를 이해할 수 있는 설명을 제공해야 합니다.
- 6) 그림 5의 기술 목표를 달성하기 위한 관점에서 미생물 대사 경로를 설계하여야 하고, 또 Biorefinery 업스트림 원료(C-C 결합이 있는 원료)<sup>25)</sup>를 제안하여야 합니다. 특히, 연구 제안자가 미생물 내에서 구현하려는 Biorefinery 업스트림 원료가 Carbon Fixing Flux의 극대화 측면에서 왜 유리한지, 그리고 화이트 바이오산업의 다양한 다운스트림 경로를 만드는 데 있어서 왜 의미가 있는지 과학적인 설명이 필요합니다.

(연구 결과 산출물 및 성능 지표)

24) 협약 전 상세 계획 수립 과정에서 책임PM과의 협의를 통해 협력 연구 수행 여부 등 결정.

25) Glucose, Sucrose, Glycogen, Starch, Dihydroxyacetone 등은 Biorefinery 업스트림 원료의 이해를 위한 여러 예중 하나이며, 본 PPR에서 요청하는 업스트림 원료를 이들 물질로 한정하는 것은 아님.

종료 단계에서 연구 결과의 우수성과 연구목표 달성도 검토를 위해 필요한 연구 결과물 산출 계획을 제시해야 하고, Carbon Fixing Flux를 포함하는 각종 미생물 성능 지표가 이에 포함되어야 합니다.

주요 마일스톤 지표로는 생산농도, 배양시간, 배양 스케일, 수율( $g_{\text{product}}/g_{\text{CO}_2}$ )이 있으며, 연구 각 단계의 우수성을 나타내는 별도의 지표, 성능, 성과물 계획도 자유롭게 제시할 수 있습니다.

#### (제외 대상)

본 프로젝트에서는 아래에 해당하는 기술 개발을 지원 대상으로 고려하지 않습니다.

- 빛(Photon)을 이산화탄소 고정화를 위해 사용하는 광합성(Photosynthesis) 연구
- 전기화학 반응을 활용한 Cascade 반응의 설계 및 이를 기반으로 목표 달성을 시도하는 연구
- 유사 연구의 중복, 후속 또는 이것을 확장하는 연구(독립된 지식 재산권 창출이 가능하지 않은 연구)
- 선행된 연구를 반복하거나 범위를 확장하는 연구
- 점진적 성능 향상 또는 개선을 시도하는 연구 등

## 4. 추진 일정

(프로그램 구조, 과제 구성)

한계도전전략센터는 다음과 같이 Beyond Biomass 프로젝트의 수행을 계획하고 있습니다.

- 과제 수: 3개 내외
- 예산 규모: 과제별 연간 4억 원 내외<sup>26)</sup>
- 연구 기간: 최대 3년 4개월 (40개월)
- 연구 진행 단계: 3단계 (1단계:16개월, 2단계:12개월, 3단계:12개월)

과제 제안자는 센터가 계획하는 자원과 기간의 범위 내에서 상기 목표의 달성을 위한 독창적인 아이디어와 새로운 접근 방식, 연구내용을 자유롭게 제시합니다.

본 과제는 단계별 평가를 통해, 다음 단계 연구수행에 대한 진행 여부(Go/No-Go)가 결정될 것이며, 연구비는 책임PM의 연구수행 내용 검토를 통해 가감 가능할 것입니다.

(기술 로드맵, 점검 평가 일정)

연구 제안자는 그림 6의 과제 추진 주요 일정을 참고하여, 수행 기간 전체에 걸쳐 연구개발 로드맵과 마일스톤 목표를 구체적으로 명시해야 합니다. 연구개발 로드맵에는 과제 수행 중간 단계에서 적용할 수 있는 성과 지표와 이를 인용한 세부 작업 내용이 포함되어야 합니다. 제안자는 전체 프로그램 일정을 준수하고 모든 프로그램 목표, 지표, 중간 단계 및 최종 성과물을 완전히 해결하기 위한 공격적인 계획을 제시해야 합니다.

한계도전 사업에서는 목표 달성을 위해 책임PM이 수시로 연구 수행자와 소통하며 매 분기 현장 방문과 전문가 패널 리뷰 미팅을 통해 연구 과정의 지식화와 진화적 Risk 관리를 계획하고 있습니다. 단계 점검을 통해 연구자가 설정한 마일스톤 목표가 달성되었는지 확인함으로써 다음 단계 연구 과제의 진행 여부를 결정할 수 있습니다. 프로젝트의 파급효과를 최대화하기

---

26) 단계별 예산 규모는 공고문 참고

위해 도전적인 연구를 시도하는 과제를 선정하여 책임PM 중심의 협력·융합 연구를 추진합니다.

#### - 주요 일정



그림 6. Beyond Biomass 프로젝트의 주요 일정

## 5. 제공 성과물

연구 책임자는 최소한 다음과 같은 연구 결과물을 제공해야 하며, 책임PM의 요청에 따라 추가 자료, 데이터를 제공해야 합니다.

- 분기별 책임PM과의 회의(현장 방문, 전문가 리뷰)에서 연구수행의 진척 상황을 파악할 수 있는 실험 데이터 및 결과 요약 자료
- 단계 점검일 2주 전까지 제출되어야 하는 단계 보고서
- 성과의 수준을 판단할 수 있는 연구 결과 산출물
- 연구수행 과정에서의 의미 있는 성과물 혹은 시행착오 대처 방안 등을 포함한 연구자의 목표 달성을 위한 노력을 입증하는 자료 등

## 6. 기타

### (협업 관련)

본 프로젝트에서는 연구과제 심사를 통해 상이한 접근 방법으로 제안된 다수의 과제를 선정할 수 있습니다. 책임PM과 한계도전전략센터는 프로젝트의 총괄 목표 달성을 위해 각 과제의 범위, 목표 등을 조정할 수 있으며, 지식재산권 혹은 이해 상충의 문제가 없는 조건에서 투명성이 보장된 협업을 추진할 수 있습니다. 각자의 접근 방식이 다를지라도 본 프로젝트의 모든 연구 수행자가 전문성에 기반한 상호 협력과 소통을 통해 목표 달성을 위해 협업이 이루어지도록 운영할 것입니다.