

곤충생물공학의 현재와 전망

최환석¹, 김선암², 신현재^{1*}

Present and Perspective on Insect Biotechnology

Hwan-Suk Choi¹, Sun-Am Kim², and Hyun-Jae Shin^{1*}

Received: 14 October 2015 / Revised: 6 November 2015 / Accepted: 9 November 2015

© 2015 The Korean Society for Biotechnology and Bioengineering

Abstract: Insects are the most successful organisms on earth in terms of their diversity and adaptability. Insect biotechnology using this insect resource is an emerging area for future biotechnology with various applications. Insect resources have long been used to make food and/or functional food, feed, cosmetics as well as medicine and industrial ingredients. Recently, one of the most well-known industrial material from insect is spider silk that could be commercialize in near future. The insect cell lines have been used to express recombinant proteins that were difficult to be functional expression. For public purpose, while, the insect could be good amenity source and plant farming, so leisure resource. Only the interdisciplinary research will guarantee the successful story for insect biotechnology. And biochemical engineers should used insect as a bioresource for new products with applications in medicine, agriculture, and industrial biotechnology in near future. This review will cover state-of-the art of this field and the research and application areas of insect biotechnology and the possible role of biochemical engineer for the development of the future biotechnology using this bioresource.

Keywords: Insect, Biotechnology, Biomass, Biochemical engineering, Spider silk, Interdisciplinary work

¹조선대학교 생명화학고분자공학과

¹Department of Biochemical and Polymer Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

Tel: +82-62-230-7518, Fax: +82-62-232-2474

e-mail: shinhj@chosun.ac.kr

²(재)전남생물산업진흥원 생물방제연구센터

²Jeonnam Bio Control Center, Jonnam Bioindustry Foundation, Gokseong 516-942, Korea

1. INTRODUCTION

최근 새로운 생물자원에 대한 논의가 활발하다. 에너지, 환경, 의료 제품 생산을 위한 기존 원료를 대체할 수 있는 신규 생물자원(biomass)을 찾기 위한 선진국들의 경쟁은 치열하고, 마땅한 자원이 없는 우리나라의 노력은 눈물겹기까지 하다. 우리가 주로 다루고 있는 미생물, 동물, 식물, 미세조류에 이은 새로운 생물자원 혹은 신규 바이오매스는 무엇이 있을까? 본 저자는 다른 무엇보다도 곤충(insect)을 첫손가락으로 꼽고 싶다. 현재 전 세계적으로 기록된 곤충 종수는 약 130만종으로 전체 생물군의 70% 내외를 차지하고 인간과 직간접적으로 관련된 종만 15,000종에 이른다. 한반도에 분포하는 곤충의 종수는 약 5만여 종으로 추정되고 이 중에 15,500여종이 기록으로 남아 있다 [1]. 선진국을 중심으로 국가 간 생물자원 확보차원에서 곤충자원 확보경쟁이 치열하며, 곤충의 활용범위는 무척 넓고 다양해서 의약, 애완, 관광, 화분매개, 환경정화, 식품, 사료, 화장품 등 유용소재 및 수출산업으로 부상할 수 있다. 따라서, 새로운 형태의 자원으로 기존 기술과의 접목을 통한 융합연구로 새로운 산업분야 창출의 돌파구를 마련할 수 있다고 판단되며, 전 세계적으로도 초기 단계인 만큼 곤충산업의 조기정착 및 유용곤충산업화 방안을 모색하는 것은 무척 중요하며 시의적절하다고 할 수 있다.

곤충자원(insect biomass)을 정의하면 다음과 같다. (1) 생물분류학 상 절지동물문으로 머리, 가슴, 배 세부분으로 이루어져 있다 [2]. (2) 위키백과에 따르면 가슴에 3쌍의 다리와 2쌍의 날개를 가진 벌레를 일컫는다 [3]. (3) 지구상에 출현한 시기는 약 4억 년 전으로 추정되며 인류가 기원이 300 만년이라고 가정할 경우 인간보다 먼저 출현하여 생존의 진화를 거듭해온 생명력이 강한 종이다. 이러한 곤충자원은 생

물화학공학(나아가 화학공학 전반에까지)과 접목 가능성이 무척 높다. 우선 국내에서는 이미 유용곤충의 분류, 동정, 탐색기술을 보유하고 있어 적절한 연구 모멘텀만 형성되면 연구개발의 추진력을 얻을 수 있다. 둘째, 생물화학공학의 연구 분야인 유전자, 단백질, 발효, 분리정제 등 다양한 분야의 연구인력이 이미 존재하여 발전을 위한 인력이 풍부하다. 그러나 아직 곤충자원에 대한 인식의 부재, 곤충의 탐사 및 자원조사 부족, 체계화된 생물종 DB 부재, 생리 및 대량배양 등에 대한 기초연구가 미흡하고 곤충시장의 영세성이 문제라고 할 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복한다면 새로운 시장의 창출기회가 도래할 수 있다. 이를 위해서 먼저 곤충산업의 법적, 제도적 보호 장치를 만들어 곤충자원의 남획을 방지하고 곤충생물공학연구를 증진하는 프로그램이 필요하다. 또한 곤충산업화와 관련된 국가적 전문 연구조직이 필요하며 나아가 곤충산업의 사회적, 개인적 인식의 확대가 필요하다고 할 수 있다.

상기의 논의를 바탕으로 곤충생물공학(insect biotechnology, IBT)를 다음과 같이 정의할 수 있다. 곤충생물공학이란 다양한 곤충자원 그 자체 및 이 자원과 관련된 생물학적 지식, 이 자원으로부터 유래되는 추출물 등을 공학적 기술과 접목하여 인류의 편의와 행복을 증진할 수 있는 모든 종류의 기술로 정의한다. 본 총설에서는 이러한 IBT 분야의 신규 연구주체의 창출과 관련 연구자들의 관심유도를 위하여 지금까지 국내외의 관련 자료를 종합하고 이를 통한 미래 발전가능성을 예측하고 유관분야 연구자들과의 공동연구 등을 제안하고자 한다. 즉 이 총설은 “생명화학공학자가 곤충을 이용하여 미래에 무엇을 할 수 있을 것인가?”에 대한 질문과 답변이다.

2. 곤충자원의 현주소

2.1. 양잠산업에서 유충, 번데기, 성충의 활용

근래 양잠산업은 새롭게 변모하고 있으며, 누에고치를 이용한 의류 산업에서 최근에는 식품과 의료 산업으로 그 산업지형이 바뀌고 있다. 누에(*Bombyx mori* L.)는 나비목(Lepidoptera) 누에나방과(Bombycidae)에 속하는 나방의 유충으로 신농본초경, 동의보감의 고서에도 그 효능이 기록되어 있으며, 민간에서는 당뇨(diabetes), 폐결핵(pulmonary tuberculosis) 및 중풍(cerebral stroke)과 질환 약제로 이용되어져 왔다 [4]. 누에가 가진 효능은 주로 당뇨병과 연관된 연구들이 이루어졌으나, 최근 들어 고지혈증, 항산화 및 항혈전 기능에 대한 누에 분말, 번데기 및 누에분변 등 다양한 소재로부터의 활성을 탐색하는 연구들이 진행되고 있다 [5]. 또한, 5령3일 동결누에가 α -glucosidase 활성을 저해하여 혈당 상승을 억제하는 작용으로 생체 내 혈당 강하 효과가 있음이 보고되었으며, 사염화탄소(CCl_4)에 의해 유도된 간 독성(hepato-toxicity)에 대해 독성에 따른 여러 생화학적 요인에 영향을 미쳐 간 보호 기능과 함께, 누에분말을 섭취한 만성간염(chronic hepa-

titis)과 간경변(liver cirrhosis) 임상 실험군에서 치료효과가 있었다는 보고가 있었다 [6]. *B. mori*의 화학조성은 조단백질 55~65%, 조지방 9~14% 정도 함유되어 있으며, 누에 번데기에도 각각 23% 및 16% 정도로 함유되어 있어 고단백질 식품소재로서 활용이 증가하고 있으며, *B. mori*의 단백질과 지방 성분 중에는 필수 아미노산과 고도불포화 지방산이 많이 함유되어 있어 간 기능이나 혈액순환 관련 건강 식품소재로 활용될 가능성이 높은 것으로 알려져 있고 [7], 특히 *B. mori* 유래 천연 단백질인 silk fibroin은 혈중 AST (aspartate transaminase) 및 ALT (alanine transferase) 활성을 현저히 저해시킴으로서 알코올성 간 독성을 개선시키는 기능을 보유하고 있는 것으로 알려져 있다 [8]. *B. mori*의 체액 중에는 다수의 단백질이 존재하고, 이 단백질은 누에의 발육단계에 따라 펩타이드 양과 조성의 변화가 발생하므로, 이에 따른 *B. mori* 유래 생리활성 펩타이드를 개발하려는 연구가 이루어지고 있다 [9]. 일본에서는 유전자조작된 누에만을 연구하는 국립연구소가 설립되어 있다(<http://www.nias.affrc.go.jp/eng/org/GMO/Silkworm/>). 한편 비단을 뽑던 누에고치도 의료용 소재로 주목받고 있는데, 거미실크 혹은 거미섬유에 대한 논의는 아래 산업용 제품부분에서 좀 더 자세히 다루도록 하겠다. 이렇듯 양잠산업 다각화는 국민건강 증진, 양잠농가 소득증대, 의료용 소재의 국산화라는 1석 3조의 효과를 얻는데 기여할 수 있다.

2.2. 유충, 번데기, 성충 추출물의 활용

곤충의 다양성과 활용성으로 인해 유용 곤충의 이용에 대한 관심도가 증가하고 있다. 곤충은 전 세계적으로 가장 다양한 180만종이 존재하는 생물군이며, 국내에서도 12,000종 이상이 서식하고 있다 [10]. 유충, 번데기, 성충 추출물의 활용범위는 식품, 의료, 화학 등 그 범위가 무척 다양하다. 곤충 유래 유용물질에 관한 연구로는 귀뚜라미(*Velarifictorus aspersus*) 추출물의 간 보호 및 항피로 효과 [11], 무당벌레(*Harmonia axyridis*)의 항산화 및 항염증효과 [12] 등이 보고되었고, 항혈전 효과로는 칠성무당벌레(*Coccinella septempunctata* Linne), 흑매미 우화허물, 바퀴벌레(*Blatta orientalis* L.), 사마귀알집 및 매미(*Lycorma emelianovi*) 등의 중국 시판 곤충에서 활성을 나타내었다 [13]. 또한, 중국시판 곤충을 포함하는 곤충시료 추출물 중 동충하초(*Paecilomyces tenuipes*), 벼메뚜기, 전갈의 물 추출물에서 항트롬빈 활성이 보고되었고 [9], 침노린재과의 흡혈곤충들에서 혈전생성 억제 활성 [14]이 알려졌다. 최근의 국내 토착곤충의 항혈전능 비교 연구 [15]에서는 70% 에탄올 및 물 추출물에 대하여 방울벌레(*Velarifictorus aspersus*) 유충 및 성충, 장수풍뎅이(*Allomyrina dichotoma*) 성충, 꽃무지(*Cetonia pilifera*) 유충 및 꿀벌(*Apis mellifera*) 유충에서 plasmin과 비교하여, 높은 혈전 용해능과 단백질 분해능을 나타내는 등, 곤충자원의 약리 기능성 식품 및 의약품 소재로 개발이 가능함을 제시하고 있다. 이 밖에도 양잠 산물 중 숫번데기 및 숫나방의 탁월한 약리효과를 확인하고 누에 분말을 이용한 혈당강하제가 개발되고 있다. 성기능 향상에

효과 있는 누에그라 및 누에 분변 속 porphyrin을 이용한 당뇨 및 암 치료제 원료 등이 상용화되어 양잠 농가의 소득 향상과 함께 경제적 잠재력이 높은 것으로 평가받고 있다.

2.3. 곤충 유전자원의 활용

2.3.1. 유전체 분석

미토콘드리아 유전자들을 동물의 계통연구에 이용하는 연구들은 매우 활발히 이루어져 왔으나 대부분의 경우 몇몇 특정 유전자들(rRNA, Cytb, COI, ND1 등)의 부분적인 염기서열만을 가지고 이루어져 왔다. 염기서열을 분석하는 기법들이 급속도로 발전하면서 최근에는 미토콘드리아 전체 염기서열이나 유전자 배열 순서를 이용하여 기존에 알려진 계통에 새로이 적용하여 계통도를 재구성하는 다양한 시도들이 행해지고 있다. 불과 몇 년 전까지만 해도 미토콘드리아의 전체 유전체 염기서열이 밝혀진 무척추동물은 10여종 정도 밖에 되지 않았으나 최근 폭발적으로 증가하고 있다. 그 중에서도 압도적으로 많이 밝혀진 분류군이 절지동물로서 약 253여종이 있다 [16]. 현재까지 약 140종의 곤충 미토콘드리아 전체 유전체가 완전히 해독되었고 딱정벌레목에서는 16종이 해독되었다. 이들은 딱정벌레목의 Polyphaga, Myxophaga, Adephaga, Archostemata에 속하는 분류군이며, 이 중에서 풍뎅이아목의 Cucujiformia와 Elateriformia에 속하는 종이 많이 밝혀져 있고, *Pyrocoelia rufa*, *Rhagophthalmus lufengensis*, *Rhagophthalmus ohbai*와 *Pyrophorus divergens*를 포함하여 4종의 유전체가 완전하게 해독되었다 [17-19]. 독일 LOEWE center for insect biotechnology & bioresource 등의 연구소에서 다양한 곤충자원의 유전체 분석과 활용이 진행 중이다 (<http://www.insekten-biotechnologie.de/en/start.html>).

2.3.2. 유전자원 현황

곤충 유전에 대한 연구는 2000년에 *Drosophila melanogaster* 종에서 처음으로 게놈 프로젝트가 완료된 이후 본격적으로 진행되고 있는 것으로 파악되고 있다. 현재까지 전 세계적으로 진행 중이거나 완료된 genome project 개수는 2007년 기준으로 총 3,126 개로, 그 중 곤충genome project는 총 46개로 아직까지는 활발한 연구활동이 이루어지지 못하고 있는 실정이다 [20]. 2000년도에 처음으로 완료된 초파리(*D. melanogaster*) genome project를 시작으로 *D. pseudoobscura*, *A. gambiae* str. PEST, *A. mellifera*, *B. mori*, 그리고 *A. aegypti* 등의 분류군에서 게놈 프로젝트가 보고되고 있으며 [21], 이에 해당하는 곤충 종은 누에나 꿀벌 등과 같이 경제적 가치를 주거나, 모기와 같이 인류에게 치명적인 질병을 매개하는 등 인간의 생활과 직접적으로 영향을 주는 종에 대해서 중점적으로 이루어지고 있으나, 이들 분류군의 중요성에 비하면 아직은 미비한 수준이라 할 수 있다. 게놈 프로젝트와 달리 대량의 유전자 서열정보를 확보할 수 있는 expressed sequence tag (EST) project는 장비의 빠른 발달과 보급으로 인해 낮은 단가로 그나마 많은 연구가 수행되고 있다. 이는 the national center for biotechnology information (NCBI)에 보고된 DNA

염기서열 총 4,594,840개 중 50%에 해당되는 2,300,364개의 DNA 염기서열이 EST project에 의해 수행되고 있으며, 실제 12종의 *Drosophila*에서 EST와 과거에 보고된 DNA 염기서열 정보를 이용한 연구가 최근 보고되었으며, 또한 다양한 조건에서 제작한 초파리의 library를 통해 얻어진 유전자를 컴퓨터를 활용한 분석을 통해 분석하는 등 EST를 이용한 다양한 연구가 수행되고 있다 [21]. 또한, 최근에는 곤충 단백질 발현에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 곤충은 외부 이물질의 침입에 대항하기 위하여 여러 가지 종류의 방어물질들을 합성하는 것으로 알려져 있으며 여러 가지 종류의 항생 활성 펩타이드와 세포성 면역 및 체액성 면역에 관여하는 다양한 종류의 단백질들이 이러한 방어기작에 이용되어지는데, 이러한 단백질들은 각각 독립된 유전자들에 의해 encode 되어 있으며 감염이나 외부이물질의 인식에 의하여 선택적 발현이 일어난다. 이러한 발현은 NF- κ B와 같은 분자의 작용에 의한 Rel family에 속하는 유전자들 및 Tor나 Cactus와 같은 신호전달 체계를 이용하는 것으로 보고되어 있다 [22].

2.3.3. 곤충생리 및 기타 현상 이해 및 활용

우리 인간의 입장에서는 곤충에게 유익과 유해라는 두 가지 측면이 항상 존재한다. 유해한 해충은 방제 및 박멸을 유익한 해충은 배양 및 생산을 화두로 접근할 수 있다. 그러나 이러한 화두와 문제점을 해결하고 발전적 방향을 모색하기 위해서는 이 두 가지 측면 모두 곤충의 생리에 대한 올바른 이해가 바탕이 되어야 한다. 최근 외국 유수의 잡지에 biological science section에 곤충의 생리에 대한 다양한 연구결과가 속속 발표되고 있다. 또한, 국내에서는 한국산 곤충유래 항생물질을 포함한 유용물질의 탐색 개발에서 잣나무넓적잎벌(*Acantholyda parki*)로부터 항생활성물질 *p*-hydroxycinnamaldehyde의 분리 및 대량생산공정 개발, 말매미에서 분리된 cryptonin의 작용기작 해명, 곤충공생미생물 유래 단백질 분해효소의 분리 및 특성과 대량생산, 벌독으로부터 ACAT와 CETP 활성저해물질의 분리 및 흰점박이꽃무지(*Protaetia brevitarsis seulensis*)의 대량인공사육 및 신기능 소재로의 활용에 대한 연구 등이 수행된 사례들이 있다. 최근 발표된 연구결과 중 주목할 점은 실크단백질인 silk fibroin의 유전자 분석결과가 발표되어 실크 단백질 구조연구의 기초가 마련되었다는 것이다 [23]. 또한 커피 나무에 감염하는 곤충의 게놈분석 결과가 발표되어 미래 해충퇴치 연구에 일조할 것으로 기대되며 [24], 흰색나비(*Pieris* sp.)의 태양광전 농축 메커니즘이 밝혀져 추후 태양광 패널의 효율증대와 관련된 연구에 탄력이 붙을 것으로 보인다 [25]. 국내 연구로서 흥미로운 것은, 곤충병원성 선충에서 분리한 공생세균의 안정화 및 항진균활성 곤충에 기생하는 선충과 이 선충에 기생하는 미생물을 이용한 항진균물질 개발연구 등을 들 수 있다 [26].

2.4. 기타 활용

2.4.1. 공익적 가치

농촌진흥청 보고(인테러벡 4호, 2011)에 의하면, 세계 곤충

산업의 시장규모는 2007년 약 11조원 규모에서 2020년 최대 약 38조원 수준으로 성장할 것으로 전망하였다. 최근 곤충 유래 식의약 소재개발을 위해 세계적 경쟁이 심화되고 있는데, 미국과 유럽연합 등은 법과 제도적 준비를 통하여 곤충 산업을 지원하고 있으며, 일본은 1980년대 초부터 애완용 곤충시장이 형성 발달되었고 유럽은 화분매개 곤충 및 천적용 곤충, 중국 등 아시아 지역에서는 식의약용 곤충 등이 발달하여 매년 시장규모가 증가하는 추세이다. 곤충의 농식품 영역은 천적, 화분매개, 사료, 식품분야에 다양하게 활용이 가능하며, 친환경농업과 시설원에 확산으로 해충방제용 천적 곤충이 많이 활용되고 있는데, 1988년부터 농작물에 피해를 주는 천적곤충을 상업적으로 활용해 왔다. 현재 35종의 천적 곤충이 연구개발 되었으며, 이 중 24종(토착 천적 16종)이 상품화되었다. 비농식품 영역으로는 정서(애완교육예술관광), 의약, 환경정화 분야 등에서 활용되고 있으며, 최근 애완학 습용 곤충분야는 가장 빨리 성장하는 분야로서, 곤충을 주제로 한 체험관광, 예술작품, 문화콘텐츠가 증가하고 있다. 이와 함께 음식물 쓰레기 등 유기성 폐기물의 친환경적 처리를 위해 환경정화 곤충이 활용되고 있으며, 곤충 유래 물질에서 기능성 의약품 소재 개발이 증가하고 있다. 미국에서는 공익적 가치가 \$570억 이상으로 추정되기도 한다 [27].

2.4.2. 경제성장의 도우미

선진국은 곤충자원을 BT, NT, IT 등 첨단기술과의 융복합으로 신약, 인간질병 치료, 생체모방 기술 등 새로운 시장을 창출하고 있으며, 프랑스는 100여종의 곤충으로부터 175개의 신물질 연구를 수행하여 최근 곤충유래 물질에서 기능성, 의약품 소재를 개발하고 있다. 이와 같은 연구결과를 바탕으로 곤충 공생 미생물, 생체모방 및 첨단 바이오센서 등 곤충의 생체구조와 기능을 이용한 산업적 활용에 대한 연구개발이 강화되어야 할 것이다. 우리의 곤충자원 산업화 특허는 300~400건으로 선진국과 비슷하지만 기술수준은 특허청 자료 (2011)에 의하면, 일본에 비하여 80%로 질적 성장이 필요하며, 생활사가 짧고 다양한 돌연변이를 보유한 초파리 연구를 확대하여 인간의 만성 난치성 질병 치료 방법 및 신약 개발을 본격화해야 할 것이다. 또한 환경정화 곤충인 동애등에 등을 이용하여 음식물 쓰레기, 가축분뇨 등의 친환경 처리기술 개발로 환경보호는 물론 신 재생에너지 분야를 개척하여 세계 시장에서 선점해야 할 것이다.

2.4.3. 미래의 융합연구 자원

곤충의 다양한 생육사(life cycle)와 생리를 연구한 결과는, 다른 분야의 기술과 접목하여 미래의 융합연구에 큰 기여를 할 수 있다. 잠자리의 나는 모습으로부터 헬리콥터가 만들어졌듯이 다양한 형태의 생체모사(biomimics)가 가능하다. 최근에는 곤충의 유인과 방제에 기존의 화학적/생물학적 방법이 아닌 빛과 소리를 이용하는 방법이 제안되어 그 가능성이 검토되고 있다. 즉 빛, 음파(sound), IT 등과 곤충생리 응용분야로서 풍부한 잠재력을 지니고 있다. 최근 농업업계 뿐만 아

니라 자동차 업계에서도 다양한 형태의 곤충관련 자원을 활용하려는 시도를 하고 있다.

2.5. 타 분야와의 융합 가능성

곤충의 기능을 다양한 영역으로 활용하기 위해 생명공학 분야뿐만 아니라 생체모방공학을 이용하고 있으며, 생명공학의 발달과 기술의 융복합 추세에 따라 곤충을 활용한 유전학 연구와 곤충의 생체모방 기술이 확산되고 있다. 생명공학 기술이나 나노 기술, 전자·통신 기술이 발전하면서 생물(생체) 모방 기술도 새로운 재료와 물질의 개발, 센서 개발, 로봇 개발 등에 나서고 있다. 뿐만 아니라 전산망 설계나 특정한 문제 해결을 위해 동물들의 행동 양식을 적용하는 등 다양한 분야에서 연구가 이뤄지고 있는데, 이런 생물 모방 기술에서 가장 주목을 받고 있는 것이 곤충이다. 생체모방 기술은 산업, 군사 분야를 넘어서 보건, 환경, 사회분야 등 커다란 시장으로 확대될 것이다. 인구 고령화, 기후변화 등의 메가트렌드에 자연모방의 대세가 기여할 여지가 매우 클 것으로 예상되며, 곤충을 비롯한 자연생태계에서의 생물 다양성을 근거로 한 바이오칩이나 초고감도 바이오센서 등 꿈의 신기술을 만들어 낼 수 있을 것이다. 우리나라의 생체모방 기술 연구개발은 단기적 가능성이 높은 산업화 과제에 집중하고 있는데, 앞으로 적극적 사고로 기술, 개념에 대한 원천에 접근하고 새로운 더 큰 시장을 선점하기 위해 노력할 필요가 있다. 응용분야에 따른 곤충생물공학의 SWOT 분석을 정리하여 Table 1에 나타내었다.

3. 곤충자원의 활용방안

곤충자원은 다양한 분야에서 활용이 가능하므로 관련 분야의 연구가 더욱 가속화되어야 한다. Fig. 1에 개략도를 표시하였으며, 아래에 활용방안을 5가지로 구분하여 설명하였다.

3.1. 식품, 사료, 기능성 식품 및 화장품

3.1.1. 식품

최근 정부에서는 2015년부터 매년 3억원씩 3년간 9억원의 연구비를 조성하여 식용곤충 조리 적성연구와 소재화 및 가공적성 연구 과제를 발주하였다. 이 연구의 내용을 살펴보면, 식용곤충의 조리특성 연구 및 레시피 개발, 식용 곤충 5종을 활용한 표준 전처리 방법 확보, 소재의 중간 상품화 연구, 가공식품 개발 연구로 이루어져 있다. 현재 식품으로 사용가능한 곤충자원으로는 오랜 기간 동안 이용되어 온 메뚜기(*Oxya chinensis siimosa*), 누에번데기 및 누에백강잠(누에나방과 곤충 누에 유충이 백강균에 감염되어 강직되어 죽은 것을 말린 전충) 외에 최근에는 갈색거저리(*Tenebrio molitor*), 흰점박이꽃무지 및 장수풍뎅이 유충, 귀뚜라미 등이 한시적으로 식품으로 허용되어 앞으로 이 부분에 대한 발전가능성이 무척 높다고 판단된다. 식품의 적용분야로는 햄버거패티, 피자 토핑, 조미료 등이 제품화되어 있으며, 그 범위는 점차 넓어

Table 1. SWOT analysis of insect biotechnology according to the application area

Application	Strength	Weakness	Opportunity	Threat
Natural enemy	National policy	Weak intervention	Strengthening market	High cost
Pollination	Enlargement of demands	Weak support of the policy	Enlargement of technical transfer	Low results
Remediation	Strengthening market	Ineptitude in insect uses	Climate changes	Insect library
Pet	Enlargement of demands	Uniformity of pet	Support of the policy	Excessive supply
Drug and Food	Enlargement of demands	Lack of popularity	Legalization	Dislike
Tourism	Expanding will	Lack of program	Succession case	Similarity of program
Feed	Substitution	Weak interest	Support of the policy	Lack of application
Bioengineering	Global potential	Weak support of a government	Government support policy	Short term support
Others	Activating R/D	Lack of advertisement	Future promising technology	Lack of popularity

SWOT: strength, weakness, opportunity, and threat.

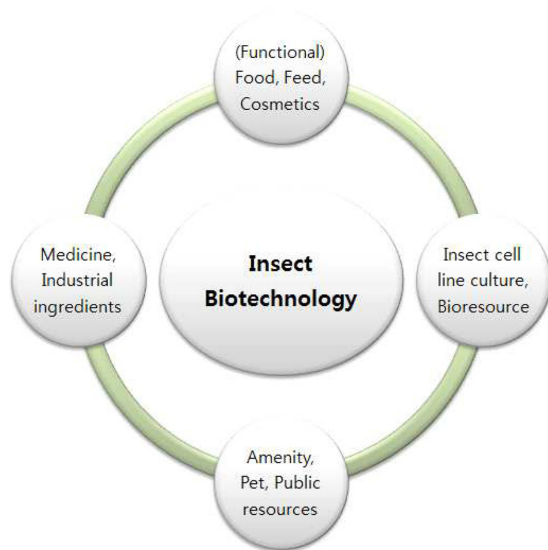


Fig. 1. Research area of insect biotechnology.

질 것으로 보인다.

3.1.2. 사료

곤충이 가축의 사료로 활용될 수 있는 주요한 요인은 곤충이 가진 영양소의 이용효율에 있다. 곤충이 섭식하는 식물성 단백질은 곤충의 체내에서 동물성 단백질로 변환되어 축적되는데, 일반적으로 가축에 비해 4배에서 최고 9배 수준으로 영양소를 효율적으로 축적한다. 곤충은 대체적으로 필수아미노산이 풍부하며, 갈색거저리, 동애등에(*Hermetia illucens*), 메뚜기 및 귀뚜라미 등은 다양한 사료 연구를 통해 동물 사료에 필수적인 단백질원으로서의 가치가 입증되어왔다. 곤충의 아미노산 조성은 대부분의 경우에서 곡물이나 콩과식물에 비해 우수한 것으로 알려져 있으며 단쇄 불포화지방산이 풍부하여 사료원으로서의 지방산 이용효율 또한 기대할 수 있다. 중국은 가잠(누에 유충)과 꿀벌(*Apis sp.*) 산업 외에 갈색거저리의 공장화 사육을 3대 곤충으로 집중 육성하고 있는

실정이다. 그러나 국내에서는 아직 사료용 곤충의 소비층이 얇기 때문에 생산에 한계가 있으며, 생물을 배합사료로 이용하기 어려운 점이 있다. 보통 필수아미노산이 풍부하나 표준화된 사육방법이 개발되지 않아 대상곤충이 섭취하는 물질에 따라 단백질 품질에 차이가 클 수도 있다. 따라서 곤충 기반 사료첨가제 사업의 성공적인 모델 구축을 위해서는 지속적인 사료곤충의 탐색 및 발굴부터 시작하여 누대사육 곤충에 대한 충질 관리와 병해충 발생에 대한 관리 대책 등의 기초 연구 및 산업화를 위한 다각적인 노력이 필요하다.

3.1.3. 기능성 식품

국내에서는 농촌진흥청(RDA) 등에서 2011년부터 곤충의 영양 가치와 동의보감 등 고서에 기록된 다양한 효능에 관심을 갖고 이들을 활용한 일반 식품 및 건강 기능 식품화에 대한 연구를 수행하고 있다. 현재 식품 소재 곤충의 많은 기능성 등이 임상적으로 증명되고 있으나, 곤충이 함유한 특정 물질에 대한 작용기작을 검증하는 것은 지속적으로 보완되어야 한다. 그러나 최근에 갈색거저리의 경우, 당뇨와 치매에 효과가 좋다는 결과를 얻었고, 기능성식품으로의 가능성을 갖고 세포를 이용한 특정한 기능성 물질을 추적하는 연구가 진행되고 있는 등 향후, 곤충의 다양한 효능을 이용한 기능성 식품 개발 가능성은 매우 큰 것으로 사료된다. 이와 같은 곤충의 일반 식품 및 기능성 식품화를 위해서는 ① 대상 곤충 선정 ② 가공 최적 조건 확립 ③ 영양 성분 및 유해 물질 분석 ④ 대표 물질 선정 ⑤ 독성 평가: 인체 무해성 확인 및 ⑥ 식품 등록 요청 등과 전략적 계획 수립이 필요할 것으로 사료된다.

3.1.4. (기능성) 화장품

오래전부터 곤충의 색소성분이 화장품에 널리 이용되고 있다. 대표적인 것으로는 코치닐 색소가 있고, 최근에 농촌진흥청의 곤충을 이용한 바이오신소재 개발 연구에서 애기뿔소똥구리와 왕지네에서 차세대 향생물질로 각광받고 있는 향균 펩타이드를 개발하였는데, 애기뿔소똥구리로부터 코프린을 발굴하여 인체에 해로운 구강균, 피부포도상균, 여드름 원인균 등에 강한 항균 활성을 나타내는 것으로 확인하였으

며, 이의 기술이전을 통하여 코프린신 함유 피부친화성 화장품을 개발하여 출시하였다. 또한, 민간 약제로 많이 이용되고 있던 왕지네에서 스콜로펜트라신 I 항균 펩타이드를 개발하고, 동물 및 세포실험에서 아토피성 피부염 치유에 효능이 탁월한 것을 확인하여 현재 산업체 기술 이전을 추진 중에 있으며, 앞으로 이 물질을 이용해 아토피 치유를 위한 화장품이나 의약품 등을 개발되면 시중의 아토피 완화제보다 더 우수한 치료제가 될 것으로 기대되고 있다. 추후 미백, 주름개선 의 효능을 지닌 기능성 화장품 원료로서 개발될 가능성도 무궁무진 하리라 판단된다.

3.2. 약용 및 의약품 원료

곤충 혹은 그 유래 물질을 의약품에 적용하기 위해서는 (1) 전통의학 관점, (2) 유용물질 탐색, 독성, 효과 검증, (3) 의약품 적용 사례 및 신약 가능성 등에 중점을 두고 다양한 자료를 검토하여야 한다. 이와 관련하여 올해 농업진흥청이 발표한 보도자료에 따르면 다음과 같은 두 가지 중요한 의약품 적용사례가 있어 본고에서 소개한다.

농촌진흥청은 세계 최초로 누에고치를 이용해 2009년 고막용 실크패치와 2014년 치과용 실크차폐막을 개발했다. 고막용 실크패치는 사람 고막과 비슷한 100 μm 의 두께와 시술에 적합한 강도(10 MPa)를 가지고 있으며, 표면이 치밀하고 매끈해 고막 재생을 촉진하는 성질을 갖고 있다. 실제 고막천공 환자에게 적용한 결과, 고막재생 성공률이 기존의 인공고막에 비해 높은 수준이었으며, 약 70% 이상의 환자에서 빠른 시일 내에 고막 재생이 완료됐다. 특히 시술 후 염증 발생 등 부작용이 관찰되지 않았고, 세균이나 곰팡이 등에 대한 감염도 나타나지 않았다. 고막용 실크패치 개발 기술은 2012년 전문 의료기기업체에 기술 이전했으며, 현재 진행 중인 임상시험을 거쳐 제품 가격을 결정하는 절차가 마무리되면 앞으로 이비인후과 병원에서 고막용 실크패치를 이용한 시술을 받을 수 있을 것으로 보인다. 또한 치과용 실크 차폐막은 손상된 잇몸 조직의 회복을 위한 잇몸뼈 재생술이나 인공치아를 이식하는 임플란트 시술 시 잇몸뼈의 양을 늘리기 위해 사용하는 막이다. 현재 시판 중인 고어텍스 소재 차폐막 보다는 8배, 콜라겐 소재 차폐막 보다는 2배 정도 우수한 잇몸뼈 형성능력을 가지고 있다.

2015년 농촌진흥청은 고부가가치 의약 소재 개발을 위해 애기뿔소뿔구리와 왕지네에서 차세대 항생물질로 각광받고 있는 항균 펩타이드를 개발하는데 성공했다고 발표했다. 항균 펩타이드는 세균 등이 침투하면 곤충이 자신의 몸을 보호하기 위해 분비하는 생체방어물질로서, 2012년 애기뿔소뿔구리에서 처음 개발한 항균 펩타이드는 인체에 해로운 구강균, 피부포도상균, 여드름원인균 등에 강한 항균 활성을 나타내는 것으로 확인됐다. ‘코프린신’으로 이름 붙여진 이 물질은 이미 5개 산업체에 개발 기술이 이전돼 이 중 한 업체에서는 코프린신 함유 피부친화성 화장품을 개발해 연 10억 원의 매출실적을 올리고 있다. 코프린신은 장내에서 급성 위막성 대장염을 일으키는 균에 대해서도 탁월한 항균 효과를 보여

현재 장염 치료를 위한 의약 소재 개발 연구도 진행 중이다. 또 다른 사례로 올해 5월에는 민간 약제로 많이 이용하던 왕지네에서 아토피 치유에 효능이 있는 항균 펩타이드를 개발해냈다. 왕지네의 학명을 따라 ‘스콜로펜트라신 I’이라고 명명한 이 물질은 동물 및 세포실험에서 아토피성 피부염 치유에 효능이 탁월한 것으로 나타났다. 이 외에 ‘스콜로펜트라신 I’ 개발 기술도 산업체 기술 이전을 추진 중에 있으며, 앞으로 이 물질을 이용해 아토피 치유를 위한 화장품이나 의약품 등을 개발할 경우 아토피로 고생하는 환자들에게 큰 도움을 줄 것으로 판단된다.

3.3. 곤충세포 배양

곤충세포를 이용하여 다양한 단백질을 생산하려는 시도가 있는데 그 중 배쿨로바이러스(baculovirus)는 높은 숙주 특이성과 강한 병인력 뿐만 아니라 매우 특이한 구조적 특성을 지니고 있어 많은 연구자들의 관심의 대상이 되고 있다 (http://cms.takara.co.kr/file/lsnb/42_06.pdf). 또한 이 발현 시스템은 많은 고등생물의 단백질, 특히 대장균에서 번역 후 수식(post-translational modification)이 완전한 형태로 일어나지 않는 단백질의 생산에 널리 사용되고 있다. 막대모양의 바이러스 입자들은 하나 혹은 여러 개의 다발로 모여서 다각체단백질(polyhedrin)에 싸여 있는데, 이 다각체단백질은 침입한 숙주곤충의 몸속에서 바이러스 입자가 방출될 때까지 외부 환경으로부터 바이러스 입자를 보호하는 역할을 하지만 활성 바이러스입자의 생존에는 영향을 미치지 않는다. 따라서 감염말기의 숙주세포 내에서 강력하게 발현되는 다각체 단백질유전자를 이용한 발현 벡터를 개발하여 곤충세포에서 백신, 인터페론 및 각종 펩타이드 등 외부 단백질을 높은 효율로 대량 생산하는 방법이 널리 사용되고 있다. 많이 이용되는 것이 누에 바이러스인 *Bombyx mori* nuclear polyhedrovirus (BmNPV)와 누에 세포(*B. mori*), *Autographa californica* nuclear polyhedrovirus (AcNPV)와 거머벌레 세포(*Spodoptera frugiperda*) 등이다. 이 발현시스템은 장단점을 고려하여 사용하여야 한다. 실험실 단계에서 성공적으로 생산되는 것으로 hepatitis B 항원, interferon- γ , tissue plasminogen activator 등이 있고 최근에는 곤충세포를 이용하여 생산된 자궁경부암 백신이 허가를 받았다. 동물세포 배양 중에서 포유동물세포(mammalian cells) 배양이 주류를 이루고 있기 때문에 양자를 혼동해서 사용하는 경우가 있다. 그러나 동물세포 배양에는 포유동물세포 이외에 곤충세포나 물고기세포의 배양도 포함되어 있다. 곤충세포는 강력한 프로모터를 갖고 있는 배쿨로 바이러스(baculovirus)에 의해 감염시켜 유용한 단백질을 생성한다. 포유동물세포 배양으로 단백질을 생산하는 경우 숙주세포로는 대개 유전자 조작된 중국 햄스터 난소세포(Chinese hamster ovary cells, CHO cells)가 이용된다. 단가항체(monoclonal antibody)를 생산하는 경우에는 하이브리도마(hybridoma) 세포를 이용한다. 포유동물세포에 유전자 재조합 처리를 위해 사용되는 운반체(vector)는 보통 영장류(primata)의 바이러스이다.

누에의 단백질 생산능력은 현재 사용되고 있는 어떤 산업 시스템보다도 뛰어나다. 또한 누에의 gland에서는 거의 순수한 형태의 단백질이 생산된다. 따라서 누에고치에서 silk-fibroin 합성이 계속 일어난다고 해도 결국 얻어지는 재조합 단백질의 분리정제는 낮은 수율을 고려해도 상대적으로 수월하다고 할 수 있다. 예를 들어 5 kg의 순수한 콜라겐을 얻기 위해서는 5명의 인력이 관리가능 한 150만 마리의 누에로부터(표면적 300 m²) 얻을 수 있다. 그리고 재조합 동물 혹은 재조합 동물세포로부터 얻어지는 재조합 단백질과 달리 바이러스나 프리온 등의 오염으로부터 자유롭다. 또한 단백질의 품질과 관련하여 곤충은 근본적으로 high mannose protein glycosylation의 능력이 있다. 최근 동물유래 glycosyltransferase 유전자의 발현에 곤충세포가 사용되어 당화의 능력을 넓혔다 [28,29].

하루살이목 *Trichoplusia ni*에서 발견된 transposon인 piggyBac을 이용하여 누에세포 숙주내에서 생식계열 형질전환이 가능한 시스템을 구축하였다. 이를 통하여 다양한 형태의 단백질 생산이 가능하다 [30]. 대부분의 transposon은 하루살이목(diptera)에서 유래된 것으로 다른 곤충에서 어떠한 기능을 하는지에 대해서는 아직도 의문이 많다. 결국 *B. mori*에 근간한 시스템은 고부가가치 단백질 특히 의료용 벌크제품의 영역에서 핵심기술이 될 전망이다. 누에를 키운 수천 년간의 노하우를 접목한다면 저비용 고수율 단백질 고치생산(spinning production)이 가능하다. 최근 유전자가 변형된 재조합 비단(silk)이 유전자조작 누에에 의해 생산되고 있다. 세 가지 다른 형광빛(녹색, 적색, 오렌지색)을 내는 비단이 만들어졌다. 여기에 사용된 벡터는 fibroin H chain 유전자로부터 기원한 것이고 전통적인 교배방법을 이용하였다. 전통기술과 최신기술이 접목되어야 하는 분야이다. 추후 기능이 보강된 비단이 만들어 진다면 다양한 의학적 적용도 가능할 것으로 판단된다 [31]. 최근 개발된 다양한 유전자조작 기법을 곤충세포에 적용하려는 시도가 이루어지고 있다 [32].

3.4. 산업용 원료

3.4.1. 거미실크

거미의 실크는 몇 가지 점에서 매우 특이한 성질을 가지고 있다. 우선 누에나방을 위시한 대부분의 곤충류가 단 한 가지 종류만의 실크를 만들어내는데 비해, 거미는 기능에 따라 섬유의 분자적 조성이 다른 여러 종류의 실크를 생산한다. 특히 대형의 둥근그물(orb-web)을 치는 왕거미과의 거미들은 7가지 이상의 서로 다른 종류의 실크를 생성하며, 각각의 용도로 구분되어 사용되고 있다. 특히 먹이를 잡기위해 만드는 거미줄에서 기본 골격이 되는 dragline 실크는 병산선(ampullate gland)에서 생성되는데, 그 물리적인 강도가 p-aramid 섬유인 Kevlar 섬유와 거의 동일하고 탄력성이 7배 우수하며, 섬유를 파열시키는데 필요한 에너지가 10배나 된다. 또한 거미 실크는 주된 구성성분이 단백질이며 이 단백질은 수용성 용액 내에서 저온 중합반응(low temperature polymerization)으로 생산된다. 현재 대부분의 섬유가 유기용매 매질하에서 고압노

즐 분사방식임을 감안한다면, 거미 실크의 생산방식은 무척 mild하고 환경친화적인 green process라 할 만하다 [33].

21세기는 거미섬유(거미실크) 혹은 합성 거미줄을 비롯한 다양한 바이오섬유의 시대라고 할 수 있다. 다양한 바이오섬유 중에서 거미섬유는 거미종이 생산하는 다양한 성질의 거미줄로 구성되어 있다. 자연계에서 생산되는 거미섬유는 단백질을 주성분으로 하는 고분자 물질로서 장력이 600,000 psi에 달하고 탄성이 200%나 되는 나노 섬유소재로서 섬유의 단위강도가 강철이나 인간이 개발한 어떤 종류의 섬유보다 우수하다. 뿐만 아니라 탄력성과 복원력, 그리고 산이나 알카리에 대한 뛰어난 화학적 내성 등으로 생물공학을 이용한 신소재 개발분야에서 주목을 받고 있다 [34]. 따라서 세계 각국에서 대장균과 식물, 동물세포에서 이 섬유를 만들어내는 연구를 진행하고 있으며, 산업화를 위해서는 섬유화를 비롯한 다양한 공정 내의 문제점을 해결하여야 한다.

최근에는 이 연구 분야를 거미생물공학 혹은 spider biotechnology라고 부른다. 거미종은 다양한 용도에 대응이 가능한 다양한 성질을 지닌 실크를 만들어 뽑아내는 능력을 가지고 있는데 최근의 연구로부터 거미가 생산한 실크는 보온성과 피부 활성을 보이는 아미노산 성분을 많이 함유하고 있는 것으로 밝혀지고 있다. 이러한 거미실크를 대량 생산을 위해 거미실크 단백질의 아미노산 배열 규명하고 이를 미생물이나 누에 알에 microinjection에 의한 거미유전자 주입을 통해 가동성 유전인자(transposon)에 vector를 사용한 유전자를 전이하여 실용 품종과의 교배를 통한 신품종 누에로부터 거미사를 추출하여 산업에 이용하고 있으며 [x], 이러한 거미실크는 의류뿐만 아니라 화장품과 의료재료, 산업항공 재료 등의 소재로 활용될 가능성이 높으며, 생분해성을 가지고 있어 인체 친화형, 친환경 신소재의 잠재성을 내포하고 있다.

누에숙주를 이용하여 거미섬유를 생산할 경우 연구의 범위는 (1) 실용품종과의 교배실시 (2) 섬유의 자세한 성능평가 실시 (3) 물성(섬도, 신도, 강도 등) 시험 실시에 의한 목표 성능검정 (4) 섬유의 성분분석 (5) 유용물질의 특성과 효능, 효과의 조사 등이 포함되어야 한다. 거미섬유는 의류 제품뿐만 아니라 화장품과 의료재료, 산업, 항공재료 등으로 사용이 가능하다. 생분해성을 가지는 생체친화형, 환경보전형의 신소재이다. 따라서 우리나라의 양잠업 활성화 및 섬유화학 산업계의 발전에 큰 공헌을 할 것으로 사료된다. 최근 합성거미줄과 실리카를 결합하여 제도가 용이하고 구조 및 형태의 변이가 가능한 복합체의 생산이 보고되기도 하였다. 배양하기 쉬운 대장균에서 생산된다면 경제성이 확보될 것이다[35]. 최근 독일의 암실크(Amsilk)사는 박테리아를 사용하여 스파이드로인(spidroin) 생산을 통해 거미실크 단백질을 만드는데 성공하여 미국 CTFA (Cosmetic, Toiletry, and Fragrance Association)에 국제 화장품 원료로 등재하기도 하였다(www.amsilk.com).

3.4.2. 곤충 유래 효소

곤충 자체를 이용한 소재 연구 외에도 곤충과 공생관계에 있

는 미생물을 이용한 다양한 효소의 생산과 개발에 대한 연구가 진행되고 있다. 현재 가장 대표적인 생물농약인 *Bacillus thuringiensis* 외에도 포식성 곤충의 일종인 무당거미의 장내에서 분리된 *Serratia proteamaculans*로부터 산업적으로 유용한 protease, chitinase 및 lipase 생산이 가능한 것으로 알려져 있다. 또한, 고추잠자리(*Sympetrum depressiusculum*)로부터 분리한 리그닌 분해효소와 털두꺼비하늘소(*Moechotya diphysis*)의 장내 미생물로부터 생성되는 xylanase도 산업적으로 이용 잠재력이 높은 것으로 알려져 있다. 곤충과 공생 관계를 갖는 미생물들은 주로 곤충의 장내에 분포하고 있기 때문에 곤충의 섭식(초식 또는 육식)과 관련되어 장내 미생물들이 생산하는 세포외효소가 곤충의 소화 생리에 밀접한 연관이 있는 것으로 알려져 있다. 곤충의 섭식 생리를 이해함에 따라서, 장내미생물 군집이 생산하는 효소의 종류와 특성에 관한 연구가 더욱 진행된다면 이를 산업적으로 활용할 수 있는 잠재적 가치는 매우 높을 것으로 판단된다.

3.4.3. 기타 산업용 원료

곤충의 다양한 생태학적 지위 특성을 이용하여 신기능 생물소재나 생체활성물질을 탐색 개발하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 곤충을 이용한 기술 및 산업은 오래전부터 인간이 이용해온 꿀벌이나 누에 등 식품이나 섬유소재, 환경오염 지표생물 등의 분야에서 널리 이용되어져 왔으며, 최근에는 생명공학기술의 발달과 함께 풍부한 생물다양성으로 인해 초파리 등 분자생물학적 연구의 유전자 소재와 거미줄을 이용한 항공우주복 섬유개발, 생체접착제, 인공피부, 화장품용 천연색소, 반딧불 유전자이용 생체발광시스템 개발 등에 이용되고 있으며, 특히, 곤충유래생체활성물질을 이용한 순환기 질환치료제와 항생제, 소염제, 면역기능 조절제, 항암제 개발을 위한 연구도 활발히 진행 중이며 곤충 세포를 이용한 인슐린, 인터페론, 백신 등의 의약품 생산은 이미 일부가 실용화 되고 있다. 이와 같이 곤충자원을 이용한 기술 분야의 응용잠재력은 곤충이 차지하고 있는 전지구적 생물다양성만큼이나 무한히 크게 기대를 받고 있으므로, 이에 대한 국가 정책적 지원 노력이 절실하다 하겠다.

3.5. 애완 및 관광자원

어메니티(amenity)란 인간이 문화적 역사적 가치를 지닌 환경과 접하면서 느끼는 쾌적함이나, 쾌적함을 불러 일으키는 장소를 일컫는다. 사전적으로는 기분에 맞음, 쾌적함, 즐거움, 예의 등 다양한 뜻을 가지고 있는데, 도시나 주거환경에서는 어메니티는 ‘쾌적한 환경’, ‘매력적인 환경’ 또는 ‘보통사람이 기분 좋다고 느끼는 환경, 상태 행위’를 포괄하는 의미로 종합적인 새로운 개념의 환경을 뜻한다. 1990년대 중반 서유럽에서 농촌 어메니티 운동 정책이 유행하면서 농어촌 발전계획에 이 용어가 사용되기 시작하였다. 농정에서 ‘어메니티’란 농촌 특유의 전원 풍경, 역사적 기념물, 지방 고유의 축제나 문화적 전통, 토속음식, 야생 동식물 등 관광이나 특산품으로 활용할 수 있는 경제적 자원을 이르는 말로 어메니

티 자원이라고 한다. 즉 쾌적한 농촌 환경을 만드는 자는 것으로, 과거 ‘개발’ 개념과는 다르게 농촌이 갖는 자연환경을 그대로 유지하면서 지역별 특성을 연구하고 이를 활용할 수 있도록 체계적으로 계획을 세워서 가꾸어나가는 것이다 [36]. 정서적 애완곤충시장(농림수산식품부, 2009)은 국내 대표적 곤충산업으로 규모는 400억 원 정도로 추정되고 있다. 그러나 이웃 일본의 경우 사슴벌레 시장만 2,000~3,000억 원 규모로, 취급점도 1,000여 곳 이상으로 활성화된 상태이며, 중국의 경우에는 시장규모는 정확히 추론되지 못하지만, 귀뚜라미 한 마리의 가격이 천만 원 이상을 호가하는 종이 있을 정도로 애완 곤충시장에 대한 기대가 큰 것이 사실이다. 국내는 아직 일본이나 중국 만큼은 아니지만 국민들의 정서 및 문화에 대한 욕구가 높아짐에 따라 수요가 증가하고 있는 추세다. 그래서 함평군에서는 호랑나비, 배추흰나비, 암끝검은표범나비 등을 인공 사육하여 매년 함평 나비축제를 개최하고 있으며, 그리고 무주 반딧불축제와 같이 지자체의 관광상품과 연계 및 학습생태원으로 관광벨트화도 가능하다. 이는 곤충시장의 한 분야로 확대 및 발전 가능성은 매우 높게 평가되고 있다.

3.6. 공공자원

3.6.1. 화분매개용

화분매개에 이용되는 뒤영벌(벌목 꿀벌과 벌)은 친환경 및 시설재배 작목의 다양화 등으로 활용되는 화분 매개 곤충이다. 우리나라의 경우 외국에서 수입한 서양뒤영벌에 의존해 왔으며, 이에 1995년부터 연구를 시작해 2000년부터는 본격적으로 자체 생산기술 개발에 착수했다. 이 연구를 통해 토종 호박벌(*Bombus ignitus*)에 대한 실내사육 환경, 인공월동 및 현장 활용법 등 주요 핵심기술을 확립했고 [3], 이후 호박벌보다 우수한 것으로 알려진 서양뒤영벌(*Bombus terrestris*)에 대한 추가 연구도 착수했다 [37]. 여왕벌의 냉장 존 기술, 교미환경 개선 등 연중사육기술 및 시설작목별 현장 활용법 수립을 통해 생산업체와 농가에 관련 기술을 지속적으로 보급해 왔다. 이후 2002년까지 전량 수입에 의존하던 서양뒤영벌을 2005년에는 50%까지 국내 생산 뒤영벌로 대체했다. 현재 생산규모는 연간 1만 5천봉군을 상회하고 있다. 2007년에는 전국적으로 약 4만여 봉군의 뒤영벌이 보급되었는데, 그 가운데 2만 8000여 봉군이 국내생산 뒤영벌로서 수입 뒤영벌 1만 2000봉군에 비해 약 70%까지 수입대체효과를 높이고 있고 이와 함께 뒤영벌을 대체할 수 있는 국내 토착 호박벌에 대한 연구가 농촌진흥청에서 진행되고 있는데, 이 기술이 확대 보급된다면, 국내 토착곤충을 이용한 친환경 화분매개 기술이 확립될 것으로 기대되고 있다 [3].

3.6.2. 천적으로 활용

천적 곤충을 이용하는 생물학적 방제 산업은 세계적으로 꾸준히 성장해 오고 있다. 전 세계 시설재배 면적의 5%에 해당하는 약 40만 ha에서 천적을 이용해 방제하고 있으며 그 추세는 점차 확산되고 있다. 천적을 이용하여 해충을

방제하는 주요 국가는 네덜란드 등 경지면적이 좁고, 유리온실 등 시설재배가 많은 유럽에서 이용률이 높으며, 네덜란드의 경우 경지면적의 95%를 천적을 이용한 해충 방제를 수행하고 있고, 경지면적이 넓고 유리온실이나 비닐하우스 등이 많지 않은 미국 등에서는 천적 이용률이 낮으며, 주로 사과 등 노지작물에 많이 이용되고 있다. 국내의 천적 개발 연구는 농촌진흥청에서 주로 이루어지고 있는데 농촌진흥청에서 개발한 해충방제용 천적 현황은 우수 천적의 탐색 선발로 천적 88종, 곤충기생균 100균주를 선발하였고, 이 중에서 천적곤충 15종, 미생물천적 4균주를 우수 천적 생물로 선발하여 현장에 이용하도록 하였으며, 천적 대량사육시스템은 칠레이리응애(*Polyphagotarsonemus latus*), 애꽃노린재(*Orius sauteri*) 등 5종에 대하여 개발이 완료되었으며, 현재 칠레이리응애 등 9종, 개발 중인 나팔이리응애(*Amblyseius barkeri*) 등 6종 등을 상품화하였다.

3.6.3. 환경정화용

곤충 중에는 썩은 동물질과 식물질, 동물의 배설물 등의 부식성 물질을 먹이로 이용하는 종류가 매우 많다. 이들은 자연에서 항상 발생하는 썩은 물질을 분해시켜 쾌적한 환경을 유지하게 하는 분해자로서 역할을 수행한다. 이 같은 습성을 가진 곤충군 중에서 집약 농업이나 인위적인 활동을 통해 발생하는 폐기물을 적극적으로 정화하거나 그 같은 활동에 투여할 수 있는 능력을 지닌 곤충을 환경정화 곤충이라 한다. 가축의 배설물 및 음식물 쓰레기 처리는 환경보전 차원에서 심각한 문제점으로 대두되고 있다. 이들 문제를 해결하기 위해서 국립농업과학원에서는 파리와 동애등애를 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 즉 집파리 대량생산 기술을 개발하여 산업체에 기술이전 하였으며, 동애등애를 이용한 음식물 쓰레기의 친환경적 분해시스템 개발 연구를 산업체와 공동으로 추진하고 있다. 뿐만 아니라 이들의 분해 산물 및 파리, 동애등애 유충을 이용한 사료화, 퇴비화 등의 연구도 활발히 진행되고 있다.

3.6.4. 유인제 개발

해충을 방제하거나 퇴치하기 위한 기술은 과거에 화학적인 방법들이 연구되어져 왔다. 특히 곤충의 화학물질에 대한 반응성을 이용한 유인 및 기피제의 연구가 최근까지 활발하게 진행되었는데 특히, 휘발성 향기 물질을 이용한 농업 해충 유인 및 기피제에 대한 연구는 상업화 단계에 이르고 있으며,

대표적인 사례는 Table 2에 정리하였다.

4. 곤충생물공학의 발전과제와 전망

앞서 기술한 바와 같이 곤충산업은 21세기 신성장 동력산업으로서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 곤충산업은 시간적, 공간적, 인력면에서 투자대비 기대효과가 큰 산업이고, 식용 뿐만 아니라 환경정화용 그리고 학습애완용 등 다양한 산업을 창출할 수 있어 미래의 신성장 동력산업으로 발전할 가능성이 높다. 특히 천적, 화분 매개, 사료용 등 농업적으로 이용이 가능하므로 우리나라 친환경 고부가가치 농업을 하기 위한 필수 산업이기도 하다. 앞으로 식용 곤충의 다양한 상품개발 및 이용, 그리고 식용곤충의 영양 및 기능성을 부각함으로써 기존 식품문화에 대한 인식을 바꾸어야 만이 사람들의 곤충식품에 대한 긍정적으로 인지도를 높일 수 있을 것이다. 기존 음식문화의 관념을 타파하고 새로운 음식관념을 수립해 사람들이 보편적으로 새로운 곤충자원을 식용으로 이용할 수 있게 함으로써 곤충산업의 발전 전망이 매우 밝다고 할 것이다. 또한 곤충산업 활성화를 위해서는 식용 곤충에 대한 개발 및 사육에서부터 식품화하기까지 연구개발 투자와 제도적 뒷받침을 통해 곤충산업이 성장할 수 있는 환경을 조성해야 할 것이다. 그리고 천적 곤충, 화분매개 곤충, 축산분뇨 및 음식물 쓰레기 분해 곤충 등은 친환경농업에 적극 활용되고 있다. 이 외에 학습애완과 의학 등에도 영향을 미치고 있어 고부가가치가 기대되는 산업 중 하나다. 이에 농촌진흥청은 앞으로도 곤충산업 관련 기술 개발 및 홍보 강화, 관련법 개정 등을 통해 녹색 신성장 동력 산업으로 육성함으로써 21세기 새로운 산업영역이 창출될 것으로 전망된다. 이를 위하여 정부도 유용곤충의 실내대량 생산 기술 및 법적 제도적 장치를 보완하고자 지난 2010년 2월 「곤충산업의 육성 및 지원에 관한 법률」을 공포하고 곤충의 법적 지위를 부여하였고, 「곤충산업 육성 5개년 종합계획」도 2011년 1월에 발표되어 전문 인력 양성, 전문기업 및 농가의 육성 등을 추진하고 있다. 또한, 2011년 1월 ‘곤충산업 육성 5개년 종합계획’을 발표하고 본격적인 곤충산업 육성에 나섰다. 아직 해결해야 할 과제가 산적해 있다. 국내에 존재하는 잠재적인 곤충자원에 대한 기초자료 확보를 통한 향후 유망자원의 발굴과 활용을 위한 인프라 구축이 우선 필요하며, 곤충자원의 분포 및 서식환경 조사, 유용곤충 탐색, 발굴된 자

Table 2. The foreign study on the insect attractant and repellent with insect chemotaxis

Research Institute*	Research Project	Nature of the research
USDA, USA (2005)	Specificity of codling moth (<i>Lepidoptera: Tortricidae</i>) for the host plant kairomone, ethyl (2E,4Z)-2,4-decadienoate	Scientific Research
CSIRO, Australia	Ecological engineering for pest management	Commercialization
DPI, Australia	Development of Insect attractant and repellent for agricultural pest management	Commercialization

*USDA: U.S. Department of Agriculture, CSIRO: The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, DPI: Department of Primary Industries.

원에 대한 DB화, 경제적 가치평가 체계 구축 등이 추진되어야 할 것으로 보인다. 이와 더불어 곤충산업 관련 연구개발을 강화하고, 법적 제도적 보완을 통해 산업화에 노력한다면 어떤 산업보다 미래의 새로운 경쟁력 있는 신생물산업이 될 것으로 사료된다. 그렇다면 생물화학공학자는 IBT 분야에서 어떤 일을 할 수 있는가? 정리하면 (1) 유전자원 확보, (2) 성분분리 및 활성확인, (3) 유전자조작, (4) 대량 배양(세포배양기/성충배양기/반응기), (5) 제품개발 등의 전분야에서 상당한 기여를 할 수 있다고 확신한다.

Acknowledgements

본 원고는 2015 한국생물공학회 곤충생물공학 연구회 지원금으로 작성되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- Rural Development Administration of KOREA, Submission of manuscript. <http://www.rda.go.kr>. (2011).
- Korea Rural Economic Institute, Submission of manuscript. <http://www.krei.re.kr>. (2007).
- Yoon, H. J., S. E. Kim, Y. S. Kim, S. B. Lee, and I. G. Park (2005) Comparison of colony development of the Korean native Bumblebee, *Bombus ignitus* and *B. ardens* depending on pasturage time and place at field net house. *Kor. J. Apicult.* 20: 133-142.
- Chung, S. H., M. S. Kim, and K. S. Ryu (1997) Effect of silkworm extract on intestinal α -glucosidase activity in mice administered with a high carbohydrate-containing diet. *Korean J. Seric. Sci.* 39: 86-92.
- Kim, Y. S., K. Y. Kim, P. D. Kang, J. Y. Cha, J. S. Heo, and Y. S. Cho (2008) Effect of silkworm (*Bombyx mori*) excrement powder on the alcoholic hepatotoxicity in rats. *J. Life Sci.* 18: 1342-1347.
- Ryu, K. S., H. S. Lee, and S. Y. Kim (1999) Effects of *Bombyx mori* L. extracts on carbon tetrachloride-induced hepatotoxicity in mice. *J. Life Sci.* 9: 375-381.
- Cho, C. H., W. S. Cha, and J. S. Kim (1989) Effect of temperature, time and pH on the extraction of protein in a chrysalis of silkworm. *KSBB J.* 4: 65-68.
- Kang, G. D., K. H. Lee, S. G. Do, C. S. Kim, J. G. Suh, Y. S. Oh, and J. H. Nham (2001) Effect of silk fibroin on the protection of alcoholic hepatotoxicity in the liver of alcohol preference mouse. *Int. J. Indust. Entomol.* 2: 15-18.
- Yun, E. Y., S. H. Kim, W. S. Kang, B. R. Jin, K. Y. Kim, H. R. Kim, M. S. Han, and S. K. Kang (1997) Molecular cloning and expression of the novel attacin-like antibacterial protein gene isolated from the *Bombyx mori*. *Korean J. Appl. Entomol.* 36: 331-340.
- Ryu, H. Y., J. C. Heo, J. S. Hwang, S. W. King, C. Y. Yun, S. H. Lee, and H. Y. Sohn (2008) Screening of thrombin inhibitor and its DPPH radical scavenging activity from wild insects. *J. Life Sci.* 18: 363-368.
- Ahn, M. Y., B. S. Hahn, K. S. Ryu, and S. I. Cho (2002) Protective effects of water/methanol extracts of cricket on the acute hepatic damages in the ICR-mice induced by administration of CCl₄. *Kor. J. Food Sci. Technol.* 34: 684-687.
- Han, S. M., S. H. Lee, C. Y. Yun, S. W. Kang, K. G. Lee, I. S. Kim, E. Y. Yun, P. J. Lee, S. Y. Kim, and J. S. Hwang (2006) Inhibition of nitric oxide production by ladybug extracts (*Harmonia axyridis*) in LPS activated BV-2 cells. *Kor. J. Appl. Entomol.* 45: 31-36.
- Heo, J. C., J. Y. Park, J. S. Hwang, H. C. Park, S. W. Kang, S. J. Hwang, C. Y. Yun, T. K. Kwon, and S. H. Lee (2006) Comparison of in vitro antioxidant activity and cyclooxygenase-2 promoter inhibitory activity in *Harmonia axyridis* Pallas and *Coccinella septempunctata* Linne. *Kor. J. Food Preserv.* 13: 513-518.
- Morota, A., H. Isawa, Y. Orito, S. Iwanaqa, Y. Chinzei, and M. Yuda (2006) Identification and characterization of a collagen-induced platelet aggregation inhibitor, triplatin from salivary glands of the assassin bug, *Triatoma infestans*. *FEBS J.* 273: 2955-2962.
- Kim, H. A., S. H. Lee, Y. C. Choi, K. H. Park, J. S. Hwang, N. J. Kim, and S. H. Nam (2013) Comparison of fibrinolytic activity from Korean indigenous insects. *J. Seric. Entomol. Sci.* 51: 147-152.
- Boore, J. L. (1999) Animal mitochondrial genomes. *Nucleic Acids Res.* 27: 1767-1780.
- Arnoldi, F. G., K. Ogoh, Y. Ohmiya, and V. R. Viviani (2007) Mitochondrial genome sequence of the Brazilian luminescent click beetle *Pyrophorus divergens* (Coleoptera: Elateridae): mitochondrial genes utility to investigate the evolutionary history of Coleoptera and its bioluminescence. *Gene* 405: 1-9.
- Bae, J. S., I. Kim, H. D. Sohn, and B. R. Jin (2004) The mitochondrial genome of the firefly, *Pyrocoelia rufa*: complete DNA sequence, genome organization, and phylogenetic analysis with other insects. *Mol. Phylogenet. Evol.* 32: 978-985.
- Li, X., K. Ogoh, N. Ohba, X. Liang, and Y. Ohmiya (2007) Mitochondrial genomes of two luminous beetles, *Rhagophthalmus lufengensis* and *R. ohbai* (Arthropoda, Insecta, Coleoptera). *Gene* 392: 196-205.
- Cho, Y. H. (2008) *Construction of insect sequence data base and new pipeline system for expressed sequence tag analysis*. Ph. D. Thesis. Jeonnam National University, Gwang-ju, Korea.
- Zhou, Y. and L. F. Landweber (2007) *BLASTO*: a tool for searching orthologous groups. *Nucleic Acids Res* 35: W678-82.
- Friedrich, M. and N. Muquim (2003) Sequence and phylogenetic analysis of the complete mitochondrial genome of the flour beetle *Tribolium castaneum*. *Mol. Phylogenet. Evol.* 26: 502-512.
- Adarsh Gupta, K., Kazuei Mita, Kallare P. Arunkumar, and Javaregowda Nagaraju (2015) Molecular architecture of silk fibroin of Indian golden silkworm, *Antheraea assama*, *Scientific Reports* 5: doi:10.1038/srep12706
- Fernando E. Vega, Stuart M. Brown, Hao Chen, Eric Shen, Mridul B. Nair, Javier A. Ceja-Navarro, Eoin L. Brodie, Francisco Infante, Patrick F. Dowd, and Arnab Pain (2015) Draft genome of the most devastating insect pest of coffee worldwide: the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*, *Scientific Reports* 5: doi:10.1038/srep12525
- Katie Shanks, S. Senthilarasu, Richard H. French-Constant and Tapas K. Mallick (2015) White butterflies as solar photovoltaic concentrators. *Scientific Reports* 5: doi:10.1038/srep12267

26. Kang, D. H., H. H. Kim, W. H. Nam, and H. S. Kim (2015) Stabilization and antifungal activity of isolated symbiotic bacteria from entomopathogenic nematodes. *KSBB J.* 30: 132-139.
27. Rural Development Administration of Korea, Submission of manuscript. <http://www.rda.go.kr>. (2007).
28. Tomita, M., H. Munetsuna, T. Sato, T. Adachi, R. Hino, M. Hayashi, K. Shimizu, N. Nakamura, T. Tamura, and K. Yoshizato (2003) Transgenic silkworms produce recombinant human type III procollagen in cocoons. *Nat. Biotechnol.* 21: 52-56.
29. Jarvis, D. L. (2003) Developing baculovirus-insect cell expression systems for humanized recombinant glycoprotein production. *Virology* 310: 1-7.
30. Toshiki, T., T. Chantal, R. Corinne, K. Toshio, A. Eappen, K. Mari, K. Natuo, T. Jean-Luc, M. Bernard, C. Gerard, S. Paul, F. Malcolm, P. Jean-Claude, and C. Pierre (2000) Germline transformation of the silkworm *Bombyx mori* L. using a *piggyBac* transposon-derived vector. *Nat. Biotechnol.* 18: 81-84.
31. Iizuka, T., H. Sezutsu, K. Tatematsu, I. Kobayashi, N. Yonemura, K. Uchino, K. Nakajima, K. Kojima, C. Takabayashi, H. Machii, K. Yamada, H. Kurihara, T. Asakura, Y. Nakazawa, A. Miyawaki, S. Karasawa, H. Kobayashi, J. Yamaguchi, N. Kuwabara, T. Nakamura, K. Yoshii, and T. Tamura (2013) Colored fluorescent silk made by transgenic silkworms. *Adv. Funct. Mat.* 23: 5232-5239.
32. Nakade, S., T. Tsubota, Y. Sakane, S. Kume, N. Sakamoto, M. Obara, T. Daimon, H. Sezutsu, T. Yamamoto, T. Sakuma, and K. T. Suzuki (2014) Microhomology-mediated end-joining-dependent integration of donor DNA in cells and animals using TALENs and CRISPR/Cas9. *Nat. Commun.* 5: 55-60.
33. Hinman, M. B., J. A. Jones, and R. V. Lewis (2000) Synthetic spider silk: a modular fiber. *Trends Biotechnol.* 18: 374-379.
34. Moon, M. J., H. Kim, and J. G. Park (2012) Biomimetic analysis on the spider silk apparatus for designing the nanofiber-spinning nozzle. *Korean J. Microscopy* 42: 67-76.
35. Xia, X. X., Z. G. Qian, C. S. Ki, Y. H. Park, D. L. Kaplan, and S. Y. Lee (2010) Native-sized recombinant spider silk protein produced in metabolically engineered *Escherichia coli* results in a strong fiber. *PNAS U.S.A.* 107: 14059-14063.
36. The publishing of Parkmungak. <http://terms.naver.com>. (2015)
37. Park, I. G., H. J. Yoon, M. A. Kim, K. Y. Lee, S. B. Lee, and S. J. Jang (2013) Effect on pollinating activities of honeybee (*Apis mellifera*), bumblebee (*Bombus terrestris*) and masonbee (*Osmia cornifrons*) in Japanese apricot field. *Kor. J. Apicult.* 28: 303-311.
38. Breznak, J. A. and A. Brune (1994) Role of microorganisms in the digestion of lignocellulose by termites. *Annu. Rev. Entomol.* 39: 453-487.
39. Heo, S., J. Kwak, H. W. Oh, D. S. Park, K. S. Bae, D. H. Shin, and H. Y. Park (2006) Characterization of an extracellular xylanase in *Paenibacillus* sp. HY-8 isolated from an herbivorous longicorn beetle. *J. Microbiol. Biotechnol.* 16: 1753-1759.
40. Kim, K. D., D. S. Park, D. H. Shin, B. N. Han, H. W. Oh, Y. N. Youn, and H. Y. Park (2006) Characterization of a ligninase producing strain, *Serratia marcescens* HY-5 isolated from *Sympetrum depressiusculum*. *Kor. J. Appl. Entomol.* 45: 301-307.