

왕겨 기반 다공성 소재의 벌통 적용 가능성과 IoT 모니터링 연계 방안 연구

김미지*, 최제호**, 김승한***, 조운찬*, 진주완*

*건양대학교 재난안전소방학과, **건양대학교 스마트농산업학과, ***건양대학교 방재보안학과
e-mail: 23683005@konyang.ac.kr

Applicability of Rice Husk-Based Porous Materials to Beehives and Integration Strategies with IoT Monitoring

Mi-Ji Kim*, Je-Ho Choi**, SeungHan Kim***, Yun-Chan Jo*, Juan Jin*

*Dept. of Disaster Safety & Fire Fighting, **Dept. of Smart Agricultural Technology and Innovation, ***Dept. of Disaster Prevention and Security, Konyang University

요약

최근 꿀벌 집단 폐사 및 실종 현상이 증가하면서 양봉 산업의 안정성 확보를 위한 기술적 개선 필요성이 대두되고 있다. 기존 벌통은 외부 환경 변화에 직접적인 영향을 받는 구조로, 내부 환경 유지가 꿀벌의 행동과 수작업 점검에 의존하는 한계를 가지며, 기존 스마트 양봉 시스템 역시 센서 기반 데이터 수집에 치중되어 구조적 환경 안정화 측면에서 한계가 존재한다. 이에 본 연구에서는 왕겨 기반 다공성 소재의 벌통 적용 가능성을 검토하고, IoT 기반 환경 모니터링과의 연계 방안을 제안한다. 왕겨의 다공성 구조를 활용하여 내부 온도 변동 및 CO₂ 축적을 완화할 수 있으며, IoT 센서를 통해 온도, 습도, CO₂ 등의 환경 데이터를 실시간으로 수집할 수 있는 시스템 구성을 제시한다. 제안된 방식은 벌통 내부 환경을 구조적으로 안정화하면서 비접촉 방식의 모니터링을 통해 이상 상황을 조기에 탐지하고, 꿀벌의 환기 및 체온 조절 부담을 줄여 군집의 에너지 소비 감소에 기여할 수 있다. 향후 다양한 환경 조건에서의 실증 실험을 통해 구조적 효과를 검증하고, 수집 데이터를 기반으로 자동 제어 기능을 포함한 통합 스마트 양봉 시스템으로 확장할 필요가 있다.

1. 서론

꿀벌은 주요 농작물의 수분을 담당하는 대표적인 화분 매개 곤충으로, 농업 생산성과 생태계 유지에 중요한 역할을 수행한다. 전 세계 작물의 약 30%가 화분 매개에 의존하며, 이 중 꿀벌은 가장 중요한 역할을 하는 곤충으로 알려져 있다[1]. 그러나 최근 꿀벌 집단 폐사 및 실종 현상이 지속적으로 보고되고 있으며, 일부 양봉 농가에서는 벌통의 절반 이상이 비어 있는 사례도 발생하고 있다. 이러한 현상은 이상 기후, 병해충, 농약 사용 등 다양한 요인이 복합적으로 작용한 결과로 분석되며, 양봉 산업 전반에 심각한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다[2].

꿀벌은 생육 과정에서 일정한 온도 범위를 필요로 하며 외부 환경 변화에 민감하게 반응한다 [3]. 특히 외부 환경 변동은 벌통 내부 온도 변화로 이어져 군집 유지에 영향을 미치며, CO₂ 농도 변화 역시 꿀벌의 행동 및 생리 상태에 직접적인 영향을 미친다[4].

하지만 기존 벌통은 목재 및 스티로폼 재질로 구성되어 외부 환경을 충분히 차단하기 어렵고, 내부 환경 유지가 벌 군집의 행동에 의존하는 경향이 있다[5]. 또한 수작업 중심의 관리 방식은 환경 변화를 실시간으로 파악하기 어렵고, 이상 발생 시 즉각적

인 대응이 어렵다. 기존 스마트 양봉 기술 역시 벌통 구조를 그대로 유지한 채 센서 중심의 모니터링에 의존하는 경우가 많아, 내부 환경을 근본적으로 안정화하는 데에는 한계가 있다 [6].

특히 왕겨는 다공성 구조를 가진 농업 부산물로, 열전도율이 낮아 단열 특성이 우수하며[7], 벌통 내부 환경 안정화에 적용 가능한 재료이다.

이에 본 연구에서는 왕겨 기반 다공성 소재의 벌통 적용 타당성을 분석하고, IoT 기반 환경 모니터링과의 연계 방안을 제안하고자 한다. 이를 통해 온도, 습도, CO₂ 등의 환경 변화를 실시간으로 관측하고, 기존 양봉 시스템의 구조적 한계와 관리 방식의 제약을 동시에 보완하여 꿀벌의 생존율 향상과 안정적인 양봉 환경 조성에 기여하고자 한다.

2. 기존 양봉 시스템의 현황 및 문제점

2.1 기존 벌통 구조 및 관리 방식의 한계

현재 양봉 산업에서 사용되는 벌통은 주로 목재, 스티로폼(EPS), 발포 폴리프로필렌(EPP), 플라스틱 등 다양한 재질로 제작되며, 외부 환경 변화에 직접적인 영향을 받는 구조를 가진다. 이와 같은 재질 및 구조적 특성으로 인해 내부 환경을 능동적으

로 제어하기 어렵고, 벌통 내부 온도 및 공기질은 일정하게 유지되기 어렵다. 이에 따라 꿀벌은 집단적 행동과 열 생산을 통해 이를 보완적으로 조절한다[7].

또한 기존 양봉 관리 방식은 수작업 점검에 의존하며, 벌통 내부 상태를 정기적으로 직접 확인하는 방식으로 운영된다. 이로 인해 내부 환경 변화를 연속적으로 파악하기 어렵고, 이상 발생 시 신속한 대응이 제한된다. 벌통 개방을 통한 점검은 벌 군집 활동에 영향을 줄 수 있으며, 반복적인 점검은 관리 효율성을 저하시킬 수 있다.

이와 같은 구조적·관리적 제약으로 인해 벌통 내부 환경을 지속적으로 관측하기 위한 기술적 수단이 필요하다. 최근에는 IoT 기반 스마트 양봉 기술이 도입되어 환경 모니터링이 가능해졌으나, 대부분의 시스템은 데이터 수집 기능에 집중되어 있어 구조적 환경 제어 측면에서는 한계가 있다. 이러한 문제 요인을 표 1과 같이 정리하였다.

[표 1] 기존 양봉 시스템의 문제 요인 분석

구분	문제 요인	영향
구조적 문제	외부 환경 차단 한계, 재질별 성능 편차	내부 온도 및 공기질 변동, 환경 유지 불안정성
관리 문제	수작업 점검 의존, 벌통 개방 점검	실시간 대응 어려움, 벌 군집 활동 영향, 관리 비효율성 증가
IoT 스마트 벌통의 한계	구조 개선 미반영	근본적인 문제 해결 어려움

이러한 한계는 단일 요소의 개선만으로 해결되기 어려우며, 구조적 개선과 관리 방식의 보완이 함께 요구된다.

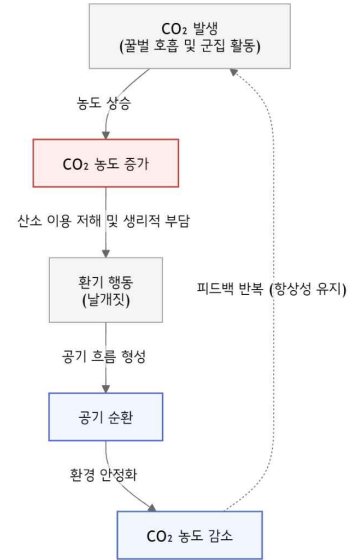
2.2 벌통 내부 환경 요소 및 영향

벌통 내부 환경은 온도, 가스 조성, 습도 등 다양한 요소에 의해 결정되며, 이는 꿀벌의 생육과 군집 유지에 직접적인 영향을 미친다. 특히 온도와 CO₂ 농도는 벌통 내부 환경을 구성하는 핵심 요소로 작용한다.

꿀벌은 발육과 산란이 이루어지는 육아권에서 약 33~36°C의 좁은 온도 범위를 유지해야 하며, 외부 환경 변화에 따라 내부 온도가 변동할 경우 생리적 활동과 군집 유지에 영향을 받는다. 이를 위해 꿀벌은 근육을 이용한 열 생산, 날개 부채질, 증발 냉각 등의 방식으로 내부 온도를 능동적으로 조절한다. 또한 벌통의 재질 및 구조에 따라 단열 성능이 달라지며, 이는 내부 온도 변동 폭에 영향을 미친다[5].

한편 벌통 내부에서는 꿀벌의 호흡과 군집 활동으로 CO₂가 지속적으로 발생하며, 내부 농도는 일반적으로 약 1,800~2,100 ppm 수준이지만 조건에 따라 수만 ppm까지 상승하는 것으로 보고된다. CO₂ 농도는 외부 환경, 기류 조건, 군집 밀도 등에 따

라 변동하며, 일정 수준 이상 높아지면 벌통 내부 공기 순환이 저해되고 산소 공급에도 지장을 줄 수 있다. 꿀벌은 날개 부채질을 통해 내부 환기를 유도하여 CO₂ 농도를 조절하는 것으로 알려져 있다.



[그림 1] 벌통 내부 CO₂ 농도 변화 및 공기 순환 조절 과정

그림 1은 벌통 내부에서 CO₂ 발생과 환기 행동에 따른 공기 순환 과정을 나타낸 것으로, CO₂ 농도의 증가와 감소가 순환적으로 이루어지는 구조를 보여준다[4].

이와 같이 벌통 내부 환경은 외부 환경 변화와 벌통 구조의 영향을 받아 지속적으로 변동한다. 특히 이러한 환경 변화는 비교적 짧은 시간 내에 발생할 수 있어 단발성 점검만으로는 상태를 정확하게 파악하기 어렵다. 따라서 안정적인 환경 유지를 위해서는 내부 환경을 실시간으로 관측하고 관리할 수 있는 체계적인 수단이 필요하다.

3. 왕겨 기반 벌통 소재의 적용 타당성 및 IoT 모니터링 연계 방안

3.1 왕겨 기반 다공성 소재의 벌통 적용 타당성

기존 양봉 시스템의 구조적 한계를 고려할 때, 본 연구에서는 왕겨를 벌통 소재로 적용한다. 왕겨는 다공성 구조와 낮은 열전도도를 지니며, 외부 환경 변화에 따른 열 전달을 완화하는 데 적합한 재료이다. 이러한 특성은 벌통 내부 온도 변동을 완화하고 공기 순환을 유도하여 내부 환경 안정화에 기여한다. 또한 다공성 구조는 공기 정체를 완화하여 CO₂ 축적을 억제하고, 내부 습도 변동 완화에도 기여할 수 있다. 이러한 재료적 특성을 기존 벌통 재질과 비교하면 표 2와 같다.

[표 2] 벌통 재질 장단점 비교

구분	목재 (杉木)[9]	스티로폼 [9]	EPP[9]	플라스틱 [9]	왕겨[10]
구조	다공성 천연재	폐공 구조 발포체	폐공 구조 발포체	밀폐성 비다공성 구조	다공성 바이오매스
통풍	보통	낮음	보통	낮음	보통 ~ 우수
내부 습도	플라스틱 보다 평균 습도 낮음	내부 습도와 변동이 높음	비흡습성 이라 구조 환기 의존	평균 습도 높고 변동 큼	38~58% 수준
내구성	뒤틀림, 부패 가능, 유지관리 필요	충격, UV 관리 필요, 부패에 강함	충격 복원성은 우수	세척, 소독이 용이	압축강도: 10~40 MPa
열전도율	0.0908 ~ 0.108	0.034 ~ 0.040	0.039	0.17 ~ 0.22	0.046 ~ 0.080

표 2에서 확인할 수 있듯이, 기존 벌통 재질은 단열 성능 또는 내구성 등 일부 특성에 치우쳐 있어, 공기 순환과 내부 환경 안정성을 동시에 확보하기 어렵다. 특히 스티로폼과 EPP와 같은 발포체 및 플라스틱 재질은 밀폐 구조로 인해 공기 흐름이 제한되며, 내부 습도 변동이 크고 외부 환경 변화에 따른 내부 환경 변동을 완화하기 어려운 특성을 보인다.

반면 왕겨는 다공성 바이오매스 구조를 기반으로 단열과 공기 순환 특성을 동시에 확보할 수 있는 재료로, 벌통 내부에서 자연적인 공기 흐름 형성이 가능하다. 이는 공기 정체를 완화하고 CO₂ 축적을 억제하여 내부 공기질을 안정적으로 유지하는 데 유리하다.

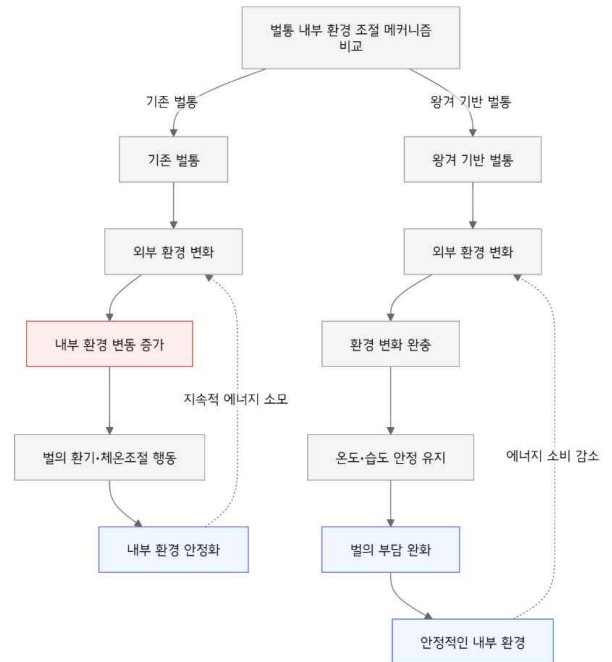
본 연구에서는 이러한 특성을 활용하여 왕겨를 벌통의 내벽 또는 단열층으로 적용하는 구조를 설계한다. 해당 구조는 외부와 내부 공간 사이의 열 전달을 줄여 내부 온도 변동을 완화하는 동시에, 공기 흐름이 가능한 구조를 유지하도록 한다. 이러한 구조는 꿀벌의 환기 및 체온 조절 행동에 대한 부담을 줄이고, 군집의 에너지 소비를 감소시킬 수 있는 환경을 형성할 수 있다. 그러나 벌통 내부 환경은 외부에서 직접 확인하기 어렵기 때문에, 지속적인 모니터링을 위한 추가적인 관측 수단이 필요하다

3.2 IoT 기반 벌통 환경 모니터링 연계 방안

본 연구에서는 벌통 내부 환경을 실시간으로 관측하기 위한 IoT 기반 환경 모니터링 연계 방안을 제시한다. IoT 시스템은 온도, 습도, CO₂ 등 주요 환경 데이터를 일정 시간 간격으로 수집하고, 시간에 따른 변화 추이를 파악할 수 있는 수단으로 활용된다. 벌통 내부 환경은 꿀벌의 생육과 군집 유지에 직접적인 영향

을 미치며, 환경 변화는 비교적 짧은 시간 내에 발생하는 특성을 가진다. 따라서 단발성 점검만으로는 상태를 정확하게 파악하기 어렵고, 이상기후, 질병, 개체수 감소와 같은 문제 역시 사후 대응 시 피해가 확대될 수 있다. 이러한 특성으로 인해 내부 환경 변화에 대한 지속적인 관측과 조기 탐지가 중요하며, 이를 위해 IoT 기반 실시간 모니터링 수단이 요구된다.

그러나 기존 IoT 기반 스마트 벌통은 센서를 통한 데이터 수집에 집중하거나, 팬 및 히터와 같은 능동 제어 장치를 통해 환경을 직접 제어하는 방식이 주를 이룬다. 이로 인해 벌통 구조 자체의 환경 안정화 기능이 충분히 고려되지 못하며, 시스템 복잡도 증가와 에너지 소비 증가라는 한계를 가진다.



[그림 2] 기존 벌통과 왕겨 기반 벌통의 내부 환경 조절 메커니즘 비교

그림 2는 기존 벌통과 왕겨 기반 벌통의 내부 환경 조절 메커니즘을 비교한 것으로, 외부 환경 변화에 대한 대응 방식의 차이를 나타낸다. 기존 벌통은 외부 환경 변화가 내부 환경 변동으로 직접 전달되며, 이를 보완하기 위해 꿀벌의 환기 및 체온 조절 행동이 지속적으로 요구된다. 반면 왕겨 기반 벌통은 다공성 구조에 의해 외부 환경 변화가 완화되어 내부 온도 및 습도를 보다 안정적으로 유지할 수 있다.

이에 본 연구에서는 왕겨 기반 벌통 구조와 IoT 기반 환경 모니터링 시스템을 결합한 스마트 양봉 시스템을 제안한다. 왕겨 기반 구조는 내부 환경 변동을 1차적으로 완화하며, IoT 시스템은 센서 데이터를 바탕으로 내부 환경 상태를 실시간으로 관측하고 변화 추이를 기록한다.

즉, 본 연구는 환경을 능동적으로 제어하기보다 구조적으로 안정화하고, 필요한 경우에만 선별적으로 대응하는 방식을 취한다.

이때 IoT 시스템은 내부 환경 상태를 정량적으로 파악하고 이상 상황을 조기에 탐지하기 위한 핵심 수단이 된다.

4. 결론

본 연구에서는 왕겨 기반 벌통 구조와 IoT 기반 환경 모니터링 시스템을 결합한 스마트 양봉 시스템을 제안하였다. 왕겨의 다공성 구조를 활용하여 벌통 내부 환경 변동을 완화하고, IoT 기반 모니터링을 통해 내부 환경을 실시간으로 관측할 수 있는 방안을 제안하였다.

제안된 시스템은 기존 벌통의 구조적 한계를 개선하는 동시에, 수작업 점검에 의존하던 기존 관리 방식의 비효율성을 보완할 수 있다. 특히 벌통 내부 환경을 비접촉 방식으로 지속적으로 관측할 수 있어, 환경 변화에 대한 대응 속도를 향상시키고 관리 효율성을 높일 수 있다.

또한 내부 환경의 변동 특성을 정량적으로 파악할 수 있어 이상 상황을 조기에 인지할 수 있으며, 꿀벌의 환기 및 체온 조절 부담을 줄여 군집의 에너지 소비를 감소시키고 안정적인 생육 환경을 유지하는 데 기여할 수 있다.

향후에는 다양한 환경 조건에서의 장기 실험을 통해 구조적 효과를 검증하고, 수집된 데이터를 기반으로 자동 제어 기능을 포함한 스마트 양봉 시스템으로 확장할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 SW중심대학사업단 Lab-Corps 프로그램의 지원을 받아 작성되었습니다.

참고문헌

- [1] 정철의, "한국 과수 및 채소 작물 생산에서 꿀벌 화분매개의 경제적 가치 평가", 한국양봉학회지, 제23권 제2호, pp. 147~152, 2008년.
- [2] 이용건, "꿀벌 피해 조사 방법 및 정책 해외사례 조사 분석", 한국농촌경제연구원, 2023년.
- [3] Stabentheiner A, "Honeybee Colony Thermoregulation - Regulatory Mechanisms and Contribution of Individuals in Dependence on Age, Location and Thermal Stress", PLoS ONE 제5권 제1호, e8967, 2010년.
- [4] William G. Meikle, "Honey bee colonies maintain CO₂ and temperature regimes in spite of change in hive ventilation characteristics", Apidologie, 제53권, 51, 2022년.
- [5] 이수진, "벌통 종류에 따른 꿀벌봉군의 내·외부온도 변화에 대한 비교분석", Journal of Apiculture 제30권 제4호, pp. 253~257, 2015년.
- [6] 신화영, "인공지능기반 스마트양봉 관리시스템 설계", 2023년도 한국통신학회 동계종합학술발표회, pp.108~109, 2023년.
- [7] 성철권, "왕겨의 보온 특성과 개발도상국으로의 적용 가능성 연구", 적정기술학회지, Vol. 3, No. 1, pp. 35~43, 2017년.
- [8] Frank Linton, "Beehive Ventilation: We Need to Know More and Do Better", Bee Culture Magazine, 2016년.
- [9] 마이비, "양봉의 기초", 양봉 교육자료.
- [10] 성용주, "왕겨의 화학적 조성 및 왕겨섬유의 형태적 특성", 펄프종이기술, Vol. 41. No. 3, pp. 22~28, 2009년.