

스마트축사 내 빗물 활용을 통한 하이브리드 급수 시스템 설계 및 효용성 분석

(Design and feasibility analysis of a hybrid watering system utilizing rainwater in smart livestock)

신현태*, 정현창*, 송기웅*, 이명훈**

(Hyuntae Shin*, Hyeonchang Jung**, Ki-woong Song***, Myunghoon Lee****)

요약

본 연구는 스마트축사 환경에서 빗물과 지하수를 혼합하여 사용하는 하이브리드 급수 시스템을 설계하고 그 효용성을 분석하는 것을 목표로 한다. 기존 축산업에서는 주로 지하수를 급수원으로 활용해왔으나, 지속적인 지하수 사용은 수자원의 고갈과 경제적 부담을 초래할 수 있다. 이에 본 연구에서는 계절별 강우량과 소의 음수량 변동성을 고려하여 빗물을 효과적으로 활용할 수 있는 시스템을 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 하이브리드 급수 시스템은 축사의 천장을 활용하여 빗물을 집수하고, 1차 및 2차 필터를 통해 이물질을 제거한 후 저장 탱크에 보관하며, 저장된 빗물의 수질 유지를 위해 기포 발생 장치와 팬 기반 물 흐름 조성 시스템을 도입하여 박테리아 및 조류(녹조) 발생을 방지하고자 하였다. 또한, 지하수와 빗물을 혼합하여 사용할 수 있도록 설계하였으며, 자동 혼합 밸브 및 유량 센서를 통해 최적의 비율로 급수함으로써 수자원 절감과 경제적 효용성을 높이려 하였다. 연구 결과, 여름철에는 빗물만으로 전체 필요 음수량의 34.7%를 충족할 수 있었으며, 봄과 가을철에는 각각 27.1% 및 22.2%의 빗물 활용이 가능하였다. 반면, 겨울철에는 강우량이 적어 빗물만으로는 10.0%만 충족할 수 있어 하이브리드 급수 시스템을 통해 부족한 부분을 보완하는 것이 필수적임을 확인하였다. 본 연구의 기여점은 스마트축사 환경에서 빗물과 지하수를 혼합하여 사용하는 급수 시스템을 구체적으로 설계하고, 계절별 급수 전략을 최적화함으로써 축산업의 지속 가능성과 경제적 효용성을 증대할 수 있음을 실증적으로 분석한 것이다. 향후 연구에서는 다양한 기후 조건에서의 실용성 검토와 장기적인 운영 비용 분석이 필요하며, 스마트 농업 정책과 연계한 실증 연구를 통해 농가의 운영비 절감 및 지속 가능한 축산업 발전에 기여할 것으로 기대된다.

■ 중심어 : 스마트축사 ; 급수시스템 ; 하이브리드 ; 수자원 절감 ; 효용성 분석

Abstract

This study aims to design a hybrid water supply system that uses a mixture of rainwater and groundwater in a smart livestock environment and analyze its effectiveness. The existing livestock industry has mainly utilized groundwater as a water supply source, but continuous use of groundwater can lead to water resource depletion and economic burden. Therefore, this study proposes a system that can effectively utilize rainwater by considering the variability of seasonal rainfall and the amount of drinking water for cattle. The hybrid water supply system proposed in this study utilizes the ceiling of the barn to collect rainwater, removes foreign substances through primary and secondary filters, and stores it in a storage tank, and introduces a bubble generator and a fan-based water flow composition system to maintain the quality of the stored rainwater to prevent the occurrence of bacteria and algae (green algae). In addition, the system was designed to use a mixture of groundwater and rainwater, and watering is done in an optimal ratio through automatic mixing valves and flow sensors to save water resources and increase economic efficiency. The results of the study showed that rainwater alone could meet 34.7% of the total potable water needs during the summer months, and 27.1% and 22.2% of rainwater could be utilized during the spring and fall seasons, respectively. On the other hand, in winter, due to low rainfall, only 10.0% of the water needs could be met by rainwater alone, confirming that it is essential to compensate for the shortfall with a hybrid water supply system. The contribution of this study is the empirical analysis of the specific design of a watering system using a mixture of rainwater and groundwater in a smart livestock environment, and the optimization of seasonal watering strategies to increase the sustainability and economic efficiency of livestock farming. Future research needs to examine the practicality under various climatic conditions and analyze long-term operating costs, and empirical studies in conjunction with smart agricultural policies are expected to contribute to reducing farmers' operating costs and developing sustainable livestock farming.

■ keywords : Smart livestock ; Watering systems ; Hybrid ; Water savings ; Utility analysis

I. 서론

전 세계적으로 기후 변화와 인구 증가로 인해 물 부족 문제가 심화되고 있으며, 이는 농업 및 축산업 분야에도

* 준회원, 국립순천대학교 스마트농업공학과

** 중신회원, 국립순천대학교 융합바이오시스템기계공학과

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대체CT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(ITP-2025-RS-2023-00259703)

접수일자 : 2025년 03월 10일

게재확정일 : 2025년 05월 26일

수정일자 : 2025년 03월 27일

교신저자 : 이명훈 e-mail : jmkim@jnu.ac.kr

큰 영향을 미치고 있다[1]. 축산업에서는 가축의 건강과 생산성을 유지하기 위해 안정적인 급수 공급이 필수적이지만, 지속적인 지하수 및 식수 사용은 수자원의 고갈과 경제적 부담을 야기할 수 있다.

따라서 물 자원의 효율적 활용과 지속 가능한 축산업 운영을 위한 새로운 급수 시스템의 필요성이 대두되고 있다.

축산업에서의 물 소비량은 계절적 요인과 가축의 생리적 특성에 따라 변동성이 크게 나타난다. 특히 여름철에는 높은 기온으로 인해 소의 음수량이 증가하며, 이로 인해 기존의 지하수 기반 급수 방식만으로는 안정적인 공급이 어렵게 될 수도 있다. 반면, 같은 여름철 시기에는 강우량이 증가하여 빗물(우수)을 효과적으로 수집할 수 있다. 빗물은 자연적으로 제공되는 친환경 자원으로서, 적절한 여과 및 저장 과정을 거칠 경우 축산업에서 충분히 활용될 수 있을 것으로 보인다[2]. 본 연구에서는 스마트축사(낙농)에서 빗물을 활용한 하이브리드 급수 시스템을 설계하고 그 효용성을 분석하고자 한다. 하이브리드 급수 시스템은 빗물과 기존 지하수를 혼합하여 급수하는 방식으로, 이를 통해 수자원 절감과 경제적 효율성을 동시에 달성하는 것을 목표로 한다. 또한, 계절적 수자원 변동을 고려한 최적의 급수 알고리즘 및 전략을 도출함으로써 최종 축산업 운영의 새로운 모델을 제시하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 하이브리드 급수 시스템의 설계 및 운영 방안을 구체화하고, 실제 운영 시 수자원 절감 효과, 경제적 이점, 가축의 건강 및 생산성에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위하여 본 논문은 1장에서 서론을 밝히고, 2장에서는 해당 연구와 유사한 관련 연구를 조사하고, 3장에서는 본 하이브리드 급수 시스템의 설계와 적정 혼합 비율을 도출한다. 본 연구에서는 스마트축사 중 낙농 분야에 초점을 맞춰 진행한다.

4장에서는 해당 급수 시스템의 테스트베드 적용 및 효용성을 분석하며, 5장에서는 결론을 정리하며 마무리 짓고자 한다.

II. 관련 연구

급수 시스템은 가축의 건강과 생산성에 직결되는

요소로, 안정적인 수자원 확보와 효율적인 관리가 필수적이다. 기존의 축산업에서는 주로 지하수나 수돗물을 이용한 급수 방식이 일반적이지만, 최근 수자원 절감을 위한 대체 급수 방식으로 빗물 활용이 주목받고 있다.

빗물은 친환경적이고 경제적인 급수 방식으로 효과적으로 적용하기 위해 다양한 연구가 수행되어 왔다. 국립원예특작과학원에서는 축사에서 빗물 이용 시스템을 설계하고 실증 시험을 수행하여 빗물 집수 가능량과 경제성을 검토하였다[3]. 본 연구와 유사한 측면이 있으나, 단순히 빗물 활용이 아닌 지하수를 혼합함으로써 효율성을 극대화하는 하이브리드형인 점에서 차이점이 있다. 또한, 경희대학교의 빗물이용시설의 설계 및 운영 관리 기술 개발 연구에서는 빗물 이용 시설의 설계 및 운영 관리에 대한 기술적 연구를 수행하였다[4]. 빗물 수집 및 저장의 최적화에 초점을 맞춘 반면, 본 연구는 축사 환경에서 빗물과 지하수를 혼합하는 방식을 통해 계절적 변동성을 고려하는 급수 전략인 점에 차별성을 나타낸다.

또한, 빗물에 대한 경제성 분석 차원에서 축산업에서의 수자원 관리 및 경제성 분석이 수행된 바 있으며, 충분한 이점이 있는 것으로 확인되었다. 현재까지 빗물과 지하수, 수돗물 등을 혼합하여 활용한 사례는 없는 것으로 확인되었고, 연구개발에 대한 필요성이 대두되었다.

III. 하이브리드 급수 시스템 설계

1. 설계 요구사항 분석

하이브리드 급수 시스템을 설계하기 위해서는 축사의 운영 환경, 수자원 이용 특성, 가축의 음수 패턴 등이 고려되어야 한다. 본 절에서는 시스템 구축을 위한 주요 설계 요구사항을 분석한다.

먼저, 강우량을 고려하여 축사 지붕 및 주변 지역에서 빗물을 수집하고 일정량을 저장할 수 있는 저장소 설계가 필요한 점과 빗물 저장소의 용량은 강우 패턴 및 소의 일일 음수량을 고려할 필요성이 있었다.

표 1. 소의 일일 음수 급이 적정량 평균[5]

계절 구분	평균 기온(℃)	평균 일일 음수량(L)
겨울(12~2월)	1.3	33.3
봄(3~5월)	12.0	45.0
여름(6~8월)	24.7	83.3
가을(9~11월)	15.0	55.0

또한, 빗물의 경우 지하수보다 미생물 및 오염물질이 포함될 가능성이 있어 필터링 및 살균 장치의 유무가 중요하게 작용하였으며 필터링 방식(활성탄, UV, 막 여과 등)을 선정이 필요했다.

표 2. 빗물 내 성분분석[6]

	Cd	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr	As
4월	0.08	5.32	10.94	15.67	1.91	2.44	1.66
5월	0.12	11.60	9.59	31.30	2.35	1.20	1.73
6월	0.04	3.99	11.14	10.52	1.38	0.47	0.71
7월	0.21	20.24	13.84	55.72	2.88	0.90	0.47
8월	0.07	5.96	10.14	20.70	1.77	0.41	0.30
9월	0.06	4.59	8.82	20.81	1.77	0.63	0.65
10월	0.13	4.20	9.17	23.69	1.29	0.49	0.91

* Cd : 카드뮴, Cu : 구리, Pb : 납, Zn : 아연 Ni : 니켈, Cr : 크로뮴, As : 비소

다음으로 지하수 및 우수의 혼합 비율에 대한 고민이 요구되었으며 저장소 내 우수의 수위를 감지하고, 필요시 전자밸브 등을 통한 음수 혼합비율 조절 시스템의 추가가 요구되었다.

이러한 조절이 필요한 이유는 빗물과 지하수의 수질 차이 때문이다. 빗물은 상대적으로 깨끗한 수자원이지만, 미네랄이 부족하여 단독으로 가축 음수로 사용하기에는 한계가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 지하수 30%를 혼합하여 부족한 미네랄을 보충하고 수질을 안정화하는 방안을 적용하였다. 지하수는 일반적으로 칼슘, 마그네슘, 나트륨 등의 필수 미네랄이 포함되어 있으며, 빗물과 혼합 시 부족한 영양소를 효과적으로 보충할 수 있다. 또한, 빗물과 지하수를 적절한 비율로 혼합함으로써 총용존고형물(TDS) 농도를 조절하여 가축이 장기적으로 섭취하기에 적절한 수질을 유지할 수 있도록 하였다.

하이브리드 급수 시스템은 빗물과 지하수를 혼합하여 공급하는 방식으로, 계절적 수자원 변동성에 대응하고 물 사용의 효율성을 극대화하는 것을 목표로 한다. 본 장에서는 스마트축사(낙농) 환경에서 최적의 하이브리드 급수 시스템을 설계하기 위하여 먼저 급수 시스템의 설계 요구사항을 분석하고, 이를 바탕으로 최종 시스템 모델을 구축하는 일련의 과정을 소개한다.

2. 최종 시스템 모델 구축

본 절에서는 설계 요구사항을 바탕으로 하이브리드 급수 시스템의 최종 모델을 구축하고 소개한다. 본 연구에서 제안하는 시스템 모델은 다음의 그림 1과 같이 나타나며, 다양한 장비들의 구성을 보인다.

낙농 천장을 활용하여 빗물을 수집하면 한곳으로 모이도록 설계되어 있다. 이 과정에서 큰 이물질들이 포함될 가능성이 있다. 따라서 빗물은 1차 필터를 통과하여 낙엽, 기타 큰 이물질을 제거하며 걸러진 이물질들은 일부 빗물과 함께 배출수(현잡물) 방출하게 된다. 2차 필터는 물속의 냄새나 유기오염물, 일부 중금속 성분, 1차 필터보다 작은 입자를 흡착하도록 활성탄과 모래층, 자갈층 순서로 구성되어 있다[7]. 이후 빗물은 물탱크에 저장되며 수위 조절기와 감우 센서, pH센서를 통하여 물탱크의 넘침 방지 및 실시간 모니터링으로 안정적인 저장 환경을 유지한다[8]. 빗물이 오랜 시간 저장이 될 경우 미생물 번식과 조류(녹조) 발생, 유기물 부패 등의 문제들을 초래할 수 있다. 따라 해당 시스템은 팬 기반 물 흐름 조성 장치를 사용하여 물이 정체되지 않도록 지속적인 유동성을 주며 조류 번식과 침전물의 생성을 최소화한다. 기포 발생 장치를 통해 물탱크 내부에 공기를 주입하여 산소 농도를 높이고 혐기성 박테리아의 번식을 억제한다. 이후 물탱크에서 3차 필터와 4차 필터를 거쳐 지하수와 혼합하게 된다. 3차 필터는 폴리프로필렌 필터 및 세라믹 필터를 사용하여 여과 크기가 0.5 μ m~5 μ m 수준으로 설정되며 마지막 정화인 4차 필터에서는 UV 살균 처리를 수행하여 박테리아와

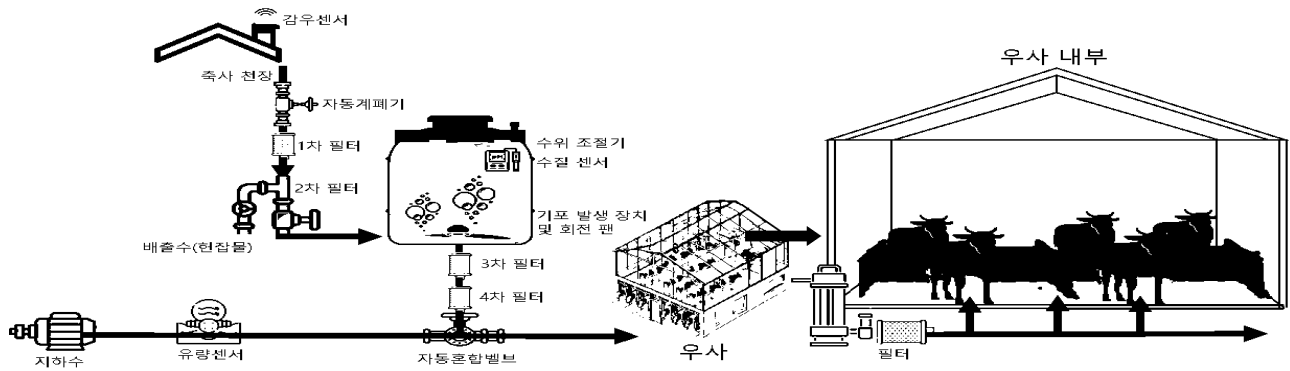


그림 1. 하이브리드 급수 시스템 전체 구성도

바이러스를 제거하고, pH 조절을 진행하여 물의 안정성을 확보한다. 이렇게 정화된 물은 지하수와 혼합하여 사용할 수 있도록 설계되었다[9]. 물탱크의 정화된 물의 양을 측정하여 자동 혼합 밸브와 유량센서를 사용하여 지하수의 공급량을 조절함으로써 효율적인 급수 시스템을 구축하고, 수자원을 절약할 수 있도록 하였다.

3. 하이브리드 급수 시스템 작동 알고리즘 설계 및 구현

본 절에서는 최종적으로 도출된 시스템이 정상적으로 작동하기 위한 일련의 S/W 프로세스에 대한 흐름도를 소개한다. 해당 시스템은 급수 모드를 설정하기 위해서 지하수 저장량, 강우량 감지 센서 값, 하루 필요 급수량, 빗물 저장량 등을 파악하여 변수를 초기 설정한다. 초기 설정을 마친 후에는 강수량 감지 및 빗물 유량을 확인하여 강우량과 최근 강우 상황을 비교하고 빗물 우선 사용 여부를 결정하며, 최소 저장 빗물보다 낮은 양의 빗물이 저장되어 있는 경우는 지하수만을 사용하여 급수를 할 수 있게 모드를 결정한. 결정된 모드에 따라 시스템은 급수를 진행하고 실시간 모니터링을 통해 수위 모니터링, 빗물 변화량 업데이트, 유입 및 수질 정화 등의 과정을 거쳐 시스템을 조정한다. 이러한 과정을 거쳐 시스템은 급수를 마치고 초기 과정으로 되돌아간다.

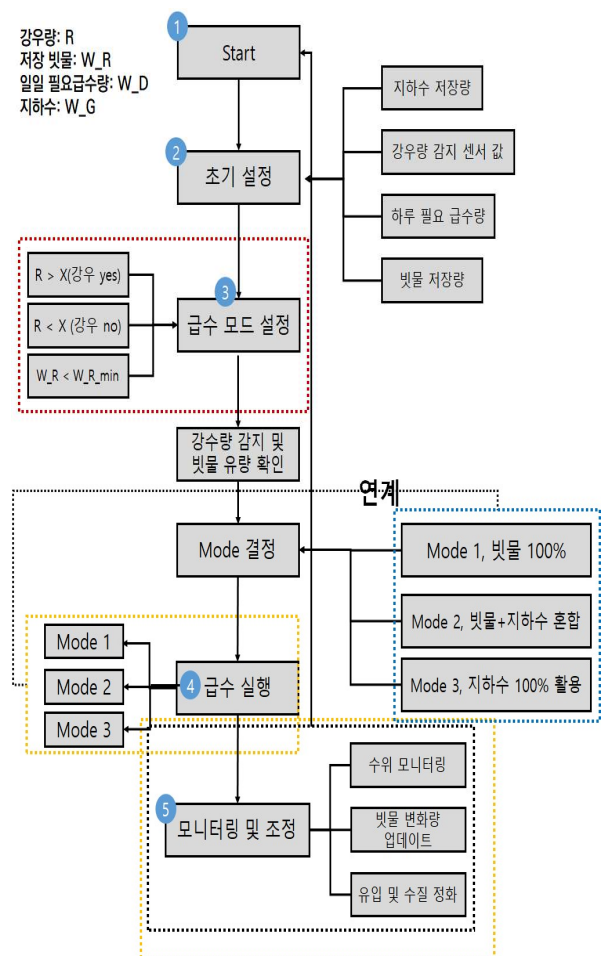


그림 2. 하이브리드 급수 시스템 Flowchart

IV. 테스트베드 적용 및 효용성 분석

본 절에서는 최종 도출된 시스템을 충청남도 홍성군 소재 300평 규모의 축사에서 적용 및 효용성 도출을 진행하였다. 해당 축사에서는 총 55마리의 착유우를 사육하고 있었으며, 기존에는 전량 지하수를 이용한 급수 방식이

운영되고 있었다.

해당 축사에서 23년 12월부터 24년 11월까지, 300평 면적의 지붕을 통해서 1년간 탱크에 모이는 빗물의 양을 측정하여 빗물 수집량을 파악하고 개별 급수 계량기를 통해 필요 급수량을 측정하여 계절별 빗물 활용 및 급수 충족률을 분석하였다.



그림 3 하이브리드 급수 시스템

표 5는 계절별 빗물 활용 및 급수 충족률에 대한 분석을 표로 나타낸 자료이다. 여름철에는 강우량이 많아 총 면적당 216,683.8L의 빗물이 내렸으나, 실제 받아 사용할 수 있는 빗물의 양은 약 15,000L였으며 이는 음수량의 약 34.7%를 충족할 수 있는 수준임을 알 수 있었다.

표 5. 계절별 빗물 활용 및 급수 충족률 분석

계절	총 빗물량(L)	필요 급수량(L)	빗물 사용량(L)	충족률 (%)
겨울 (12~2월)	34,304	149,850	15,000	10.0
봄 (3~5월)	66,754	202,500	55,000	27.1
여름 (6~8월)	216,863	374,850	130,000	34.7
가을 (9~11월)	105,987	247,500	55,000	22.2

(3개월 동안 300평 착유우 55마리 기준)

반면, 겨울철에는 강우량이 감소하여 빗물량이 34,034.3L로 줄어들었으며, 실제 수집하여 사용한 빗물의

양은 수집 가능한 전체 필요 음수량 대비 충족률은 10%에 불과했다. 봄과 가을철의 경우, 각각 55,000L(27.1%) 및 약 55,000L(22.2%)의 빗물이 확보되어, 여름철보다는 낮지만, 일정 수준의 활용 가능성을 보였다.

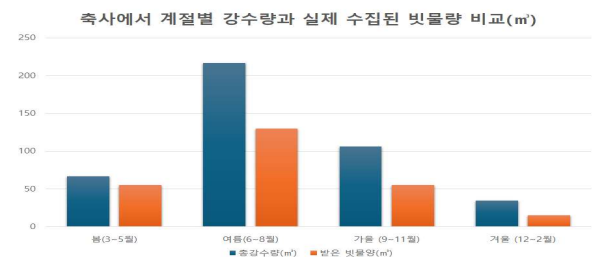


그림 4. 계절별 강수량과 실제 수집된 빗물량 비교

이를 통해 여름철에는 빗물 활용 비중을 극대화하고, 겨울철에는 지하수 의존도를 증가시키는 계절별 맞춤형 급수 전략이 필요함을 알 수 있다.

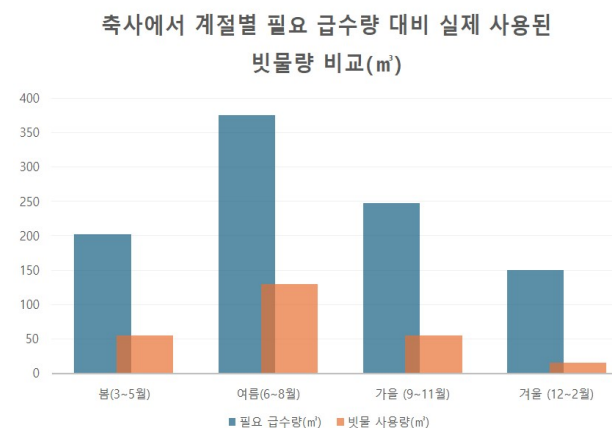


그림 5. 계절별 필요 급수량 및 사용된 빗물량 비교

해당 시스템의 테스트베드 적용 및 효율성 분석 결과, 기존 지하수를 절약하여 축산업의 지속 가능성을 높이는 방향에서 해당 연구가 실효성을 지녔음을 확인할 수 있었다.

V. 결론

본 연구에서는 스마트축사 환경에서 빗물과 지하수를 혼합하여 사용하는 하이브리드 급수 시스템을 설계하고, 계절별 효율성을 분석하였다. 기존 축산업에서 주로 활용하는 지하수 의존도를 줄이고, 빗물을 효과적으로 활용하여 수자원 보존과 경제적 부담 완화를 목표로 설계된 시스

템이다.

연구 결과, 여름철에는 전체 음수량의 34.7%를 빗물로 충당할 수 있었으며, 봄과 가을에는 각각 27.1% 및 22.2%의 활용이 가능하였다. 겨울철에는 강우량 부족으로 충족률이 10%로 감소하였으나, 하이브리드 시스템을 통해 보완할 수 있음을 확인하였다. 또한, 강우량이 많은 지역에서는 빗물 활용을 극대화할 수 있어 지역 맞춤형 적용 가능성이 높음을 시사한다.

본 연구의 핵심 기여는 축산 환경에서 빗물과 지하수를 혼합하여 사용하는 급수 시스템의 설계 및 최적 급수 방안을 도출하였다. 도출하는 과정에서 특정지역으로 한정하진, 다양한 환경 조건이 고려되지 않은 점, 지역적 대기 오염의 농도 등 몇 가지의 제약사항이 나타났으나, 처음으로 빗물을 활용하여 축사의 급수시스템에 적용한 바에 대한 차별성이 존재하였다. 본 제약조건에 따른 사항은 향후 추가 연구를 통해 장기적인 경제적 절감 효과, 유지보수 비용, 기후 변화 대응 방안 마련 등으로의 보완을 통하여, 보다 안정적인 급수 체계를 구축하는 데 기여할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] 임영아, “농업용수 수요 특성과 물부족 대응 방안,” *한국농촌경제연구원*, 19-44쪽, 2017년 10월
- [2] 최동운, 조성백, “폭염시 착유우 고온스트레스 경감을 위한 빗물관수시스템 이용 효과,” *축산시설환경학회지*, 제18권, 21-28쪽, 2012년 1월
- [3] 전종길, 백이, “빗물이용 시스템 실용화 및 현장 실증연구,” *국립원예특작과학원*, 9-35쪽, 2013년 1월
- [4] 김이호, 김영민, “빗물이용시설의 설계 및 운영관리 기술 개발,” *한국건설기술연구원*, 23-28쪽, 2011년 5월
- [5] 기광석, “하절기 소에 있어서 물의 중요성,” *국립축산과학원*, 4-5쪽
- [6] 정구복, 이종식, 김원일, 김진호, 윤수강 “수원지역 빗물의 중금속 함량 평가,” *농업과학기술원 환경생태과, 농촌진흥청 연구개발국 연구관리과*, 118-119쪽, 2007년 06월
- [7] 안재운, 이동섭, 한신인, 정영욱, 최항석. “빗물 재 활용을 위한 모래 정화층의 폐색특성을 고려한 비점오염원 제거 예측 모델 연구,” *한국지반공학회는*

문집, 제30권, 제6호, 24-39쪽, 2014년 6월

- [8] 김철경. “빗물 집수 및 저장 시스템 개선과 수질 분석 모니터링. 청정기술,” *청정기술*, 제17권, 제4호, 353-362쪽, 2011 12월
- [9] 정연태. “빗물 재활용을 위한 하이브리드 우수처리 장치 개발 및 평가에 관한 연구,” *대한건축학회연합논문집*, 제19권, 제5호, 115-120쪽, 2017년 10월

저 자 소 개



신현태(준회원)

2025년 ~ 국립순천대학교 스마트농업공학과 석사과정 재학

<주관심분야 : IoT, 인공지능, 스마트 농업, 하드웨어>



정현창(준회원)

2025년 ~ 국립순천대학교 스마트농업공학과 석사과정 재학

<주관심분야 : 미디어처리, 스마트농업, 인공지능, IoT>



송기웅(준회원)

2025년 ~ 국립순천대학교 스마트농업공학과 석사과정 재학

<주관심분야 : 스마트 농업, 가상센서, 스마트 워크, IoT>



이명훈(중신회원)

2006년 국립순천대학교 정보통신공학과 석사 졸업

2011년 국립순천대학교 정보통신공학과 박사 졸업

2010년 ~ 2013년 한국전자통신연구원 선임연구원

2017년 ~ 2021년 국립농업과학원 연구사

2021년 ~ 현재 : 국립순천대학교 융합바이오시스템기계공학과 교수

<주관심분야 : 빅데이터 활용, 스마트 농업, 인공지능, 전파 응용 기술, 표준화 >