

# EnergyPlus를 활용한 스마트팜 내 환기팬 최적 제어

신 학 중<sup>°</sup>, 조 성 균<sup>\*</sup>, 김 세 한<sup>\*</sup>

## Optimal Control of Ventilation Fan in Smart Farm Using EnergyPlus

Hakjong Shin<sup>°</sup>, Seng-Kyoun Jo<sup>\*</sup>, Se-Han Kim<sup>\*</sup>

### 요 약

축사의 경우 가축들의 분뇨로 인한 오염물질들이 많이 발생하고 가축들이 실내 온열 환경에 예민하게 받아들이기 때문에, 축사 내 생산성 확보를 위해서는 실내 쾌적성을 유지하는 것이 중요하다. 대부분의 축사의 경우 중간기/냉방기에는 별도 열원 없이 환기팬에 의한 외기 도입에 의존해 실내 온열 환경 및 공기질을 유지하고 있기 때문에, 일반 건물에 비해 환기 시스템이 실내 환경 유지에 차지하는 비중이 크다. 이에 본 연구에서는 동적 에너지 시뮬레이션 툴인 EnergyPlus를 활용하여 축사용 에너지 모델을 개발하여 환기팬 최적 제어 전략 도출에 관한 연구를 진행하였다. 그 결과, 표준 기상 데이터를 활용하여 도출된 최적 제어 적용 시 충분한 실내 온도를 유지함과 동시에 기존 제어 전략 대비 높은 에너지 저감 가능성을 나타냈다. 이와 같은 연구 방법 및 결과는 에너지 효율적인 축사 운영에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

**Key Words** : Smart farm, EnergyPlus, Ventilation fan, Optimal control, Energy consumption

### ABSTRACT

To ensure productivity in livestock facilities, maintaining comfortable indoor environment is necessary as livestock excrement generate many pollutants and livestock are sensitive to indoor temperature. In most livestock facilities, the ventilation system accounts for a large proportion of the indoor environment maintenance compared to general buildings as the temperature and air quality are maintained by only introducing external air using a ventilation fan without a separate heat source for the mid-term and cooling seasons. Therefore, this study conducted a study on deriving an optimal control strategy for ventilation fans by developing an energy model for livestock using EnergyPlus, a dynamic energy simulation tool. As a result, when applying the optimal control derived using standard meteorological data, it maintained a sufficient indoor temperature and showed high energy reduction potential compared to the existing control strategy.

※ 본 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다.  
(No. 2018-0-00387, 축산질병 예방 및 통제 관리를 위한 ICT 기반의 지능형 스마트 안전 축사 기술 개발).

•° First and Corresponding Author : Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, South Korea, puremorning11@uos.ac.kr, 학생회원

\* SDF Convergence Research Laboratory, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, South Korea, 정회원  
논문번호 : 202109-230-0-SE, Received August 27, 2014; Revised October 19, 2021; Accepted October 25, 2021

## 1. 서 론

최근 친환경 및 온실가스 저감이라는 국제적인 흐름으로 인해 건물 내에서의 에너지 사용량 저감에 관한 관심이 커져가고 있다. 이러한 요구들에 발맞춰 센싱 기술의 발전 및 상용화로 인해 건물의 에너지 사용량, 열적 거동과 관련된 데이터 수집을 통한 BEMS (Building Energy Management System) 도입이 확산되고 있다<sup>[1]</sup>. BEMS는 설비 시스템 제어 상태, 실내외 환경 데이터 분석을 통한 설비 시스템 제어 자동화, 에너지 사용량 모니터링 등과 같이 다양한 부분에서 에너지 저감 가능성을 나타내고 있다.

이러한 센서와 네트워크 기술은 일반 건물뿐만 아니라 스마트팜이라 불리는 온실, 축사와 같은 건물에서까지 확산되고 있는 추세이다<sup>[2-5]</sup>. 스마트팜은 ICT 기술을 활용한 농장 운영과 관련된 전반적인 요소들에 대한 모니터링을 통해 인공지능 및 빅데이터 등의 기술과 융합하여 생산성 및 동물 복지 확대를 주목적으로 하고 있다. 이에 따라 스마트팜 내 모니터링 데이터 분석을 통해 효율적이고 생산적인 축사 운영에 관한 연구들이 많이 이루어지고 있다<sup>[6-7]</sup>. 특히, 축사의 경우 가축들의 분뇨로 인한 오염물질들이 많이 발생하고 가축들이 실내 온열 환경에 예민하게 받아들이기 때문에, 축사 내 생산성 확보를 위해서는 실내 적정 온도를 유지하는 것이 중요하다<sup>[8-12]</sup>. 또한, 축사 내부에는 가축들의 분뇨로 인한 오염물질들이 많이 발생하고<sup>[13]</sup>, 이는 축사 내 생산성에 상당한 영향을 끼칠 수 있다<sup>[14]</sup>. 이러한 점들과 맞물려 최근에는 동물 복지에 관한 요구 또한 커지고 있기 때문에<sup>[15]</sup>, 축

사 내 쾌적성 확보를 위한 환기 시스템 적용 및 운영에 관한 관심이 증대되고 있는 추세이다.

축사에 적용되는 환기 시스템은 크게 자연 환기, 기계 환기 시스템으로 구분할 수 있다. 자연 환기의 경우 별도의 에너지를 사용하지 않고 신선하고 시원한 외기 도입을 통해 실내 환경을 유지할 수 있지만, 기상 조건 및 건축 디자인 요소들에 따라 그 효과가 달라질 수 있다. 반면, 기계 환기 시스템의 경우 균일한 외기 도입량을 토대로 보다 쾌적한 실내 환경을 확보할 수 있다. 이러한 기계 환기 시스템은 에너지 소비를 발생시키기 때문에 효과적인 환기 성능뿐만 아니라 에너지 효율성 또한 요구되며, 이를 위해서는 환기 팬의 에너지 효율 및 외기 조건에 따른 환기 성능을 고려한 제어 전략이 필요하다. 이에 본 연구에서는 축사 건물을 대상으로 건물 외피, 환기 시스템, 기상 및 내부 발열 조건 등을 통합적으로 고려할 수 있는 에너지 모델을 개발 하였고, 모델을 토대로 환기팬 최적 제어 전략 적용에 관한 연구를 진행하였다.

그림 1은 스마트팜에서의 에너지 모델의 활용 방안을 간략하게 나타내고 있다. 에너지 모델 개발 시 실제 축사에서의 실측 데이터를 토대로 예측 성능을 확보한다. 이 때, 예측 값은 특정 기상 및 팬 운영 조건에 따른 에너지 사용량과 실내 온도를 의미한다. 개발된 에너지 모델은 표준 기상 데이터를 활용한 시뮬레이션 분석을 통해 미래의 최적 제어 전략을 도출한다. 실제 운영 단계에서는 도출된 제어 전략을 토대로 모니터링 되고 있는 실내 온도를 제어 기준으로 팬의 최적 운영 상태를 제시한다. 본 연구에서는 이와 같은 에너지 모델을 활용한 환기팬 최적 제어 적용에 따른

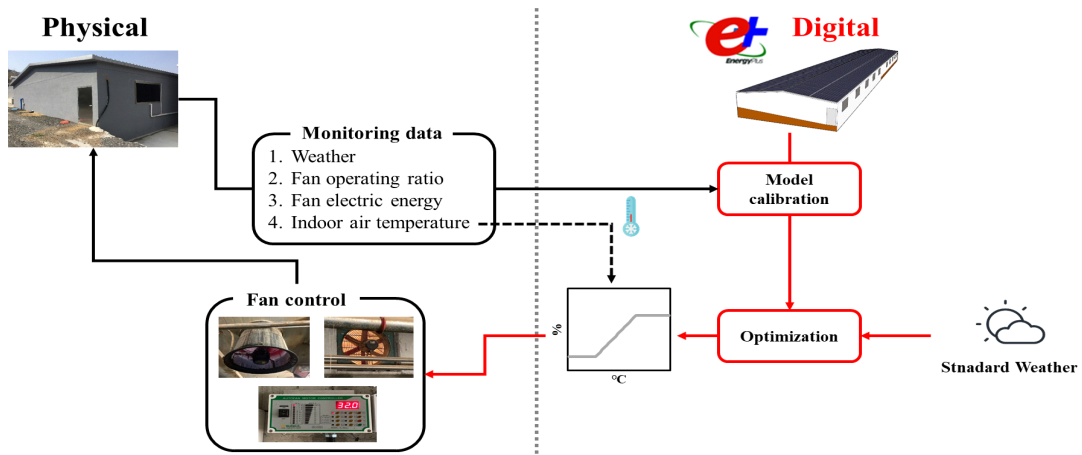


그림 1. 스마트팜 내 에너지 모델 활용  
Fig. 1. Application of energy model to smart farm

실내 환경 유지 성능 및 에너지 사용량 저감 가능성에 대하여 분석하였다.

## II. 연구방법

### 2.1 대상 축사

본 연구는 대한민국 순천의 축사 시설 중 새끼 돼지를 사육하는 자돈사를 대상으로 진행되었다. 자돈사는 2개의 자돈방과 1개의 환돈방으로 구성되어 있으며, 바닥 형태는 slatted floor로 자돈의 분뇨를 지하에서 처리한다. 각 자돈방에는 최대 900마리의 자돈이 약 50일 간격으로 사육되고 있다. 그림 2는 자돈사 내·외부를 나타내고 있다. 각 자돈방에는 천정팬 4대와 남측벽에 6개의 배기팬이 설치되어 있으며, 환기 설비 외에 난방용 복사패널을 통해 실내 설정 온도를 26℃~30℃로 유지하도록 난방방 운영을 하고 있다. 또한, 자돈사 북측면 벽에는 Cooling pad가 설치되어 있어 혹서기 냉방을 위해 활용되고 있다. 본 연구에서는 2개의 자돈방 중 1개의 자돈방을 대상으로 하여 연구를 진행하였다.

대상 자돈방은 표 1와 같이 실내 환경을 비롯하여 기상 조건, 자돈의 상태, 설비 시스템 제어 상태에 관한 데이터를 5분 간격으로 그림 3와 같이 모니터링 중이다. 자돈방 곳곳에 온·습도 센서를 설치하여 실내 온열 환경 제어에 활용하고 있으며, 이산화탄소 및 암모니아 농도 모니터링을 통해 자돈의 쾌적한 환경을

표 1. 측정 데이터 항목  
Table 1. Measured data

Indoor environment	Air temperature, Relative humidity, CO <sub>2</sub> & NH <sub>3</sub> concentration
Weather	Air temperature, Relative humidity, Wind direction & speed, Radiation, Rainfall
Occupancy	Water & Feed intake, Average weight
Operation	Fan operating ratio, Boiler and Cooling-pad on/off
Energy	Fan electric energy, Boiler electric energy

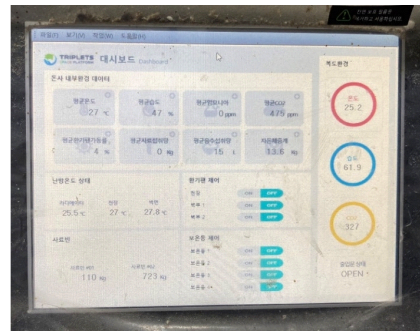


그림 3. 데이터 모니터링 현황  
Fig 3. Data monitoring dashboard

유지하고 있다. 또한, 자돈사 입구에 설치된 기상 스테이션을 통해 실외 온·습도, 풍향, 풍속, 일사, 강수량 등의 전반적인 외기 조건 데이터를 수집하고 있다. 실내외의 환경 정보 외에도 평균 체중 및 사료 섭취량 데이터를 수집하여 자돈의 상태를 실시간으로 모니터링 중이다.

자돈사의 경우 자돈의 배설물 때문에 암모니아 발생률이 높아 환기 시스템을 항상 가동하고 있다. 쿨링 패드의 경우 혹서기에만 가동되어 연중 1~2일 정도만 작동하고 있어 난방기를 제외한 냉방기 및 중간기에는 환기팬만을 활용하여 실내 환경을 유지하고 있다. 그림 4는 자돈방에 설치된 천정 및 측벽 배기팬을 나타내고 있으며, 팬의 성능은 표 2와 같다. 연구 기간 동안에는 오직 천정 배기팬만 가동되었기 때문에, 측벽 배기팬과 관련된 데이터는 수집되지 않았다. 이에 따라, 본 연구에서는 천정팬 작동에 따른 실내 온도 및 에너지 사용량 데이터를 토대로 에너지 모델을 개발하였다.



그림 2. 대상 축사 내·외부  
Fig. 2. External and internal view of the pigsty

표 2. 환기팬 모델 성능  
Table 2. Specification of ventilation fan

	Model	Power (W)	Design Flow rate (CMH)
Ceiling	SLF-500D4-6 (4EA)	418	8,500
Wall	SLF-500A4-6 (6EA)	535	8,500

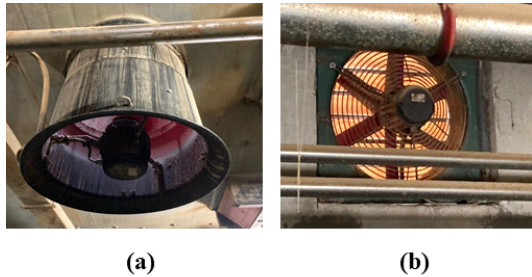


그림 4. (a) 천정팬; (b) 벽책팬  
Fig. 4. (a) Ceiling fan; (b) Wall fan

2.2 에너지 모델 개발

대상 축사의 에너지 모델 개발을 위하여 물리 기반 건물 에너지 모델링 툴인 EnergyPlus 9.0을 활용하였다. EnergyPlus는 미국의 연방 정부기관인 Department of Energy (DOE)에서 개발한 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램이다. EnergyPlus는 Heat balance method를 통해 부하를 계산 하고, 이를 통해 건물 내 전도, 복사, 대류 열 전달에 대한 동적 해석이 가능함으로 높은 신뢰성을 보인다. Heat balance method는 실 내부의 공기는 완벽히 혼합되어 있는 상태이며, 각 건물 부재의 표면 온도 분포가 동일하면서 균일한 장파, 단파를 받는 확산복사표면(diffused radiation surface)의 벽체를 통한 1차원의 열 전도라는 가정하에 열 전달을 계산한다. 또한, 실의 열적 거동 및 설비 시스템의 거동을 통합적으로 고려하여 모델링 하기 때문에 건물과 시스템 간의 유기적인 분석이 가능하다. 이러한 건물 통합 시뮬레이션 분석 방법은 EnergyPlus를 차별화하고 높은 정확도와 신뢰성을 갖게 한다.

표 3은 baseline 에너지 모델의 입력 값을 나타내고 있다. 벽체의 경우 설계 도면에 기재된 재질을 사용하였고, 재질의 열 성능은 ‘한국패시브건축협회’에서 제공하는 값을 적용하였다. 축사 내부 발열을 고려하기 위하여 조도 350 lux 기준으로 조명 부하를 산정하였

표 3. 에너지 모델 입력값  
Table 3. Energy model input value

U-Value [W/m <sup>2</sup> ·k]	Roof	0.114
	Ceiling	0.431
	Wall	0.311
	Floor	2.462
Internal Loads	Pig	4.71 W/kg
	Lights	9.46 W/m <sup>2</sup>
	Equipment	5.2 W/m <sup>2</sup>
Air exchange	Infiltration rate	5.8 ACH
	Fan Flow rate (100%)	1.36 m <sup>3</sup> /h

고 [16], 돼지 발열의 경우 기존 연구를 참고하여 체중 당 발열량을 4.71W로 설정하였다 [17]. 별도의 참조 값을 찾기 어려움과 동시에 불확실성이 큰 기기 발열, 침기울, 팬풍량의 경우 과거 데이터(6월 30일)의 실내 온도 데이터를 토대로 실측된 실내 온도와 모델의 실내 온도 예측값 간 MAE (Mean Absolute Error)를 목적 함수로 두고 최적화 기법을 활용하여 해당 변수들의 입력 값들을 도출하였다.

대상 자돈사에 적용된 팬의 경우 Variable Frequency Drive (VFD) 방식으로 전압 변경을 통해 해당 팬의 회전수를 조절한다. 본 연구에서는 팬 구동에 따른 실내 공기 유동에 관한 별도의 실험이 이루어지지 않았기 때문에, 제조사의 성능 실험 데이터를 토대로 팬의 구동률(회전수)에 따른 팬의 풍량이 선형적인 관계를 나타낸다고 가정하였다. 이를 토대로 에너지 모델 내 팬 스케줄 적용 시, 팬의 구동률에 따라 팬 풍량이 반영될 수 있도록 구현하였다.

VFD 팬의 에너지 사용량은 팬의 구동률에 따라 다르게 나타나며, 이러한 부분 부하 특성은 팬의 모델 별로 다르게 나타난다. EnergyPlus 내에서는 이러한 부분 부하 특성을 별도의 Fan Pressure Rise model을 고려하지 않고 simple Polynomial based curve-fit model을 활용하여 팬의 구동률과 전력 사용량의 관계를 나타내고 있다. 이러한 부분 부하 특성을 반영하기 위해 그림 5와 같이 팬 구동률에 따른 전력 사용량 과

표 4. 에너지 모델 예측 성능  
Table 4. Performance of energy model

	ASHRAE Guideline 14 (%)	Model error (%)
MBE	±10	-0.82
CVRMSE	30	2.32

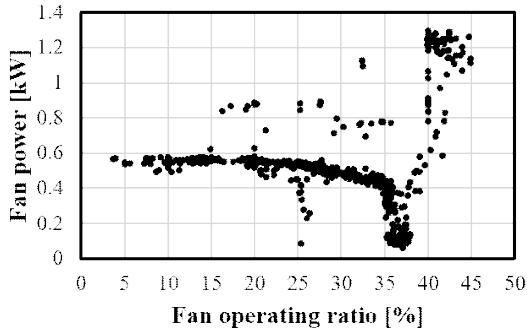


그림 5. 팬 구동률에 따른 팬 전력 사용량 (5/25 ~ 6/30)  
Fig. 5. Fan electric energy according to operating ratio (5/25 ~ 6/30)

거 데이터를 활용하여 팬의 구동률에 따른 부분 부하율에 대한 4차 다항식 모델을 개발하여 에너지 모델에 반영하였다.

### 2.3 최적 제어 전략 도출

대상 축사의 설치된 환기팬은 실내 온도에 따라 회전수가 변하는 VFD (Voltage Frequency Drive) 방식으로 제어되고 있다. 제어 변수로는 최대/최소 구동률, 최고/최저온도 4가지이며 설정된 4가지 입력 변수 값에 따라 그림 6와 같이 최소환기, 가변환기, 최대환기 3구간으로 나누는 형태의 제어 전략이 결정된다. 최소환기 구간은 실내 온도가 최소 온도보다 낮은 구간을 나타내며 실내 공기질 유지를 위해 최소 구동률로 팬이 제어된다. 최대환기 구간은 실내 온도가 최대 온도보다 높은 구간을 나타내며, 이 때에는 실내 온도를 낮추기 위해 최대 구동률이 적용된다. 실내 온도가 최대/최소 온도 사이에 있을 때는 가변환기 구간으로 실내 온도에 따라 선형적으로 구동률이 제어된다. 현재 대상 축사에서는 관리자 경험에 의거하여 임의로 4가지 입력 변수들이 설정되며, 자돈의 생육 주차에 따라 최대 온도를 0.5℃ 낮게 설정하고 있다.

이러한 팬의 제어 방식은 기상 조건, 내부 환경, 팬의 부분 부하율 등에 따라 에너지 최적화를 위한 설정 조건이 상이하게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 순천 지역의 표준 기상 데이터를 활용하여 개발된 에너지 모델의 시뮬레이션 분석을 통해 도출된 1주일 단위의 환기팬 최적 제어의 적용성을 검토하였다.

최적 제어 전략은 그림 7에서와 같이 해당 timestep 이전에 순천의 표준 기상 데이터와 최적화 프로그램 툴인 GenOpt를 통해 해당 timestep에서의 가장 에너지 효율적인 최적 팬 설정 값(최대/최소구동률, 최고/최저온도) 형태로 도출된다. 이 때 적용된 최적화 알

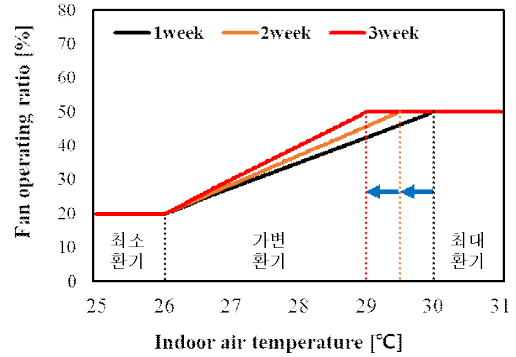


그림 6. 기존 환기 제어 시스템  
Fig. 6. Conventional ventilation control system

고리즘은 PSO (Particle Swarm Optimization)을 통해 초기화되는 Hybrid GPS 알고리즘인 GSPSOCCHJ 알고리즘이 적용되었다. 표 5는 최적화 작업에 적용된 제어 변수들의 제약 조건을 나타내고 있다. 본 연구에

표 5. 최적화 변수 제약 조건  
Table 5. Optimization variable settings

	Maximum	Minimum	Step size
Maximum operation (%)	50	30	5
Minimum operation (%)	10	20	5
Maximum temperature (°C)	30	28	0.1
Minimum temperature (°C)	28	26	0.1

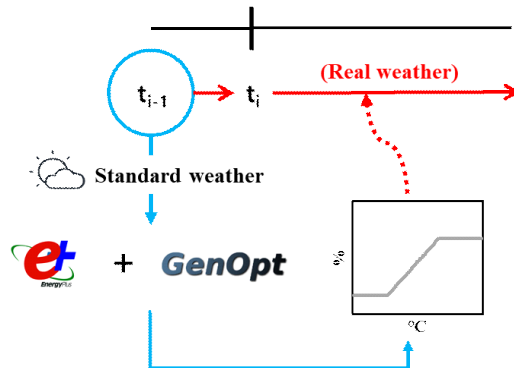


그림 7. 환기팬 최적 제어 전략 도출  
Fig. 7. Development of optimal control of ventilation system

서는 이와 같이 도출된 최적 제어 전략의 에너지 저감 성능을 검토하기 위해, 7월 1일 ~ 21일 3주간 1주일 간격의 최적 제어 적용에 따른 시뮬레이션 결과값과 실측 데이터 간 비교 분석을 진행하였다. 이 때, 표준 기상 데이터의 실제 적용성 검토를 위해, 도출된 최적 제어 전략을 적용한 시뮬레이션 분석 시 실제 측사에서 측정된 기상 데이터를 적용하였다.

### III. 연구 결과

표준 기상을 활용하여 도출된 환기팬의 7월 1~3주 최적 제어 전략 결과는 그림 8과 같이 나타났다. 1~3주 모두 최대 환기량은 부분 부하율이 비교적 낮은 35%로 설정되었으며, 나머지 제어 변수들은 서로 상이하게 나타났다. 이는 각 주차별 표준 기상에 해당되는 가장 에너지 효율적인 제어 전략을 의미한다. 본 연구에서는 도출된 주차 별 최적 제어 전략 시뮬레이션 적용에 따른 실내 온도 및 에너지 사용량을 기준

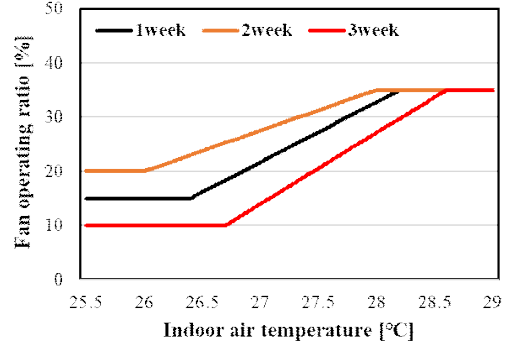


그림 8. 주차별 최적 제어 전략  
Fig. 8. Weekly optimal control strategy

제어 방식 적용에 따른 실측 데이터 값과 비교 분석하였다.

그림 9는 시간 별 실내 온도를 나타내고 있다. 해당 기간 동안 실제 측사는 평균 29.62°C로 운영되었으며, 최적 제어 적용에 따른 시뮬레이션 결과는 평균 28.49°C로 비교적 낮게 나타났다. 실측 및 시뮬레이션 결

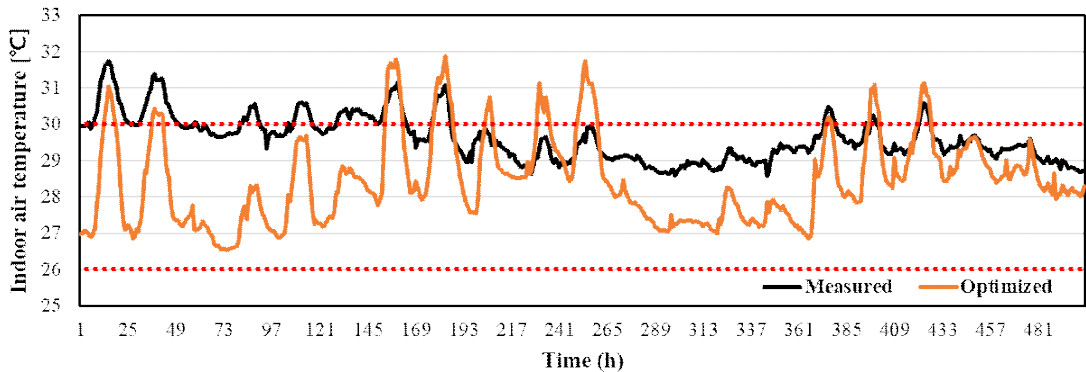


그림 9. 실내 공기 온도 비교 (시간별)  
Fig. 9. Indoor air temperature comparison (hourly)

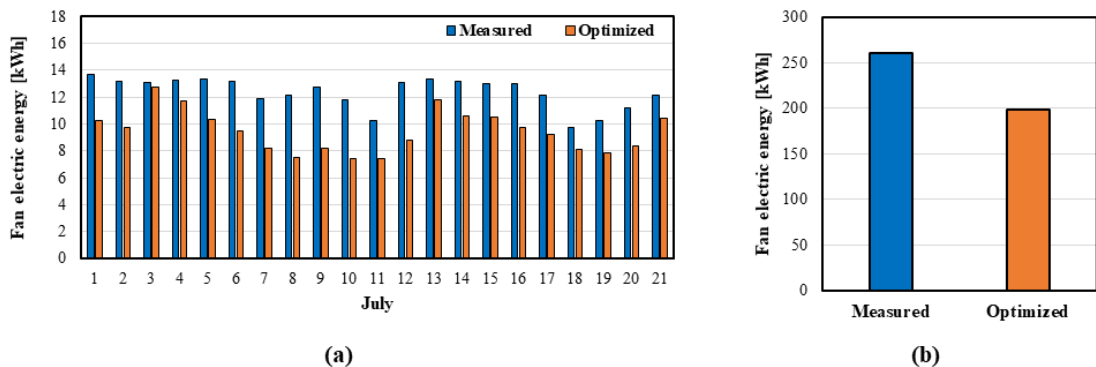


그림 10. 에너지 사용량 비교 (a) 일별 ; (b) 전체  
Fig. 10. Energy consumption comparison (a) Daily ; (b) Total

과 값 모두 대부분 설정 온도 범위 26 ~ 30°C를 만족시키는 것으로 나타났지만, 실제 측사에서는 30°C를 초과하는 시간 비율이 24.6%인 반면 시뮬레이션 결과는 13.7% 에 그쳤다. 이는 본 연구에서 도출된 환기팬 최적 제어 전략이 충분한 실내 온도 유지 성능을 가진다는 것을 의미한다.

그림 10은 실측값과 시뮬레이션 결과값의 에너지 사용량을 비교하고 있다. 최적 제어 적용 시 실제 사용량 대비 총 23.5% 낮은 에너지 사용량을 나타냈으며, 해당 기간 모든 일자에서 에너지 저감 가능성을 보였다. 가장 높은 에너지 저감 가능성을 나타낸 일자는 8일로 실제 사용량 대비 38.14% 가량 낮

은 에너지 사용량을 나타냈다. 이는 기존 제어 방식과 같이 단순히 생육 단계별로 최고 온도 설정값을 변경하기 보다는, 팬의 부분 부하 특성 및 기상 조건을 고려하여 제어 전략을 결정하는 것이 에너지 효율적인 운영임을 의미한다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 측사에서의 에너지 모델을 활용한 환기팬 최적 제어 전략의 적용성을 분석하였다. 이를 위해 측사에서의 실측 데이터들을 활용하여 모델의 예측 성능을 확보하였으며, 개발된 모델을 토대로 최적화 시뮬레이션을 통해 최적 제어 전략을 도출하였다. 그 결과, 최적 제어 적용 시 충분한 실내 온도를 유지함과 동시에 높은 에너지 저감 가능성을 나타냈다. 이와 같은 연구 방법 및 결과는 에너지 효율적인 측사 운영에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

현재 실제 측사에서는 실내 온도 외에도 가축의 분노에 의해 발생하는 오염물질들 또한 환기의 주요 제어 요소로 고려하고 있다. 이에 따라 보다 고도화된 측사 운영을 위해서는 실내 온도뿐만 아니라 실내 공기질 또한 통합적으로 고려한 환기팬 최적 제어 전략이 필요하다. 또한, 표준 기상의 경우 과거 데이터에 대한 통계 처리를 통해 만들어졌기 때문에 별도의 예측 없이 개발에 활용될 수 있지만, 예측 성능에 대한 검토가 필요할 것이다.

#### References

[1] D. M. Hernandez, L. H. Callejo, A. Z. Lamadrid, O. D. Perez, and F. S. Garcia, "A review of strategies for building energy management system: Model predictive control,

demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis," *J. Building Eng.*, vol. 33, 2021.

[2] A. R. Al-Ali, A. Al Nabulsi, S. Mukhopadhyay, M. S. Awal, S. Fernandes, and K. Ailabouni, "IoT-solar energy powered smart farm irrigation system," *J. Electr. Sci. and Technol.*, vol. 17, no. 4, 2019.

[3] P. Suanpang and P. Jamjuntr, "A smart farm, prototype with an internet of things (IoT) case study: Thailand," *J. Advanced Agric. Technol.*, vol. 6, no. 4, Dec. 2019.

[4] W. Iwasaki, N. Morita, and M. P. B. Nagata, "14-IoT sensors for smart livestock management," *Chem., Gas, and Biosensors for Internet of Things and Related Appl.*, pp. 207-221, 2019.

[5] S. K. Jo and S. H. Kim, "Digital twin-based smart livestock house - case study," *J. KICS*, vol. 45, no. 8, pp. 1472-1481, 2020.

[6] F. N. Fote, A. Roukh, S. Mahmoudi, S. A. Mahmoudi, and O. Debauche, "Toward a big data knowledge-base management system for precision livestock farming," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 177, pp. 136-142, 2020.

[7] C. Bahlo, P. Dahlhaus, H. Thompson, and M. Trotter, "The role of interoperable data standards in precision livestock farming in extensive livestock systems: A review," *Comput. and Electr. Agric.*, vol. 156, pp. 459-466, 2019.

[8] A. J. A. Aarmink and M. W. A. Verstegen, "Nutrition, key factor to reduce environmental load from pig production," *Livestock Sci.*, vol. 109, no. 1-3, pp. 194-203, 2007.

[9] Y. Hu, H. Cheng, and S. Tao, "Environmental and human health challenges of industrial livestock and poultry farming in China and their mitigation," *Environ. Int.*, vol. 107, pp. 111-130, 2017.

[10] E. F. Hessel, C. Zurhake, H. F. A. Van Den Weghe, "Heating and cooling performance of an under floor earth tube air tempering system in a mechanical ventilated farrowing house," in *Proc. XVIIIth World Congress of the Int.*

*Commission of Agric. and Biosyst. Eng. (CIGR)*, Québec, Canada, Jun. 2010.

- [11] N. Quiniou, S. Dubois, and J. Noblet, "Voluntary feed intake and feeding behaviour of group-housed growing pigs are affected by ambient temperature and body weight," *Livestock Production Sci.*, vol. 63, pp. 245-253, 2000.
- [12] A. Collin, J. van Milgen, S. Dubois, and J. Noblet, "Effect of high temperature on feeding behaviour and heat production in group-housed young pigs," *Br. J. Nutrition*, 86, pp. 63-70, 2001.
- [13] T. M. Banhaziab, P. Stott, D. Rutley, V. Blanes-Vidal, and W. Pitchford, "Air exchanges and indoor carbon dioxide concentration in Australian pig buildings: Effect of housing and management factors," *Biosyst. Eng.*, vol. 110, no. 3, pp. 272-279, 2011.
- [14] C. Lee, L. R. Giles, W. L. Bryden, J. L. Downing, P. C. Owens, and A. C. Kirby. "Performance and endocrine responses of group housed weaner pigs exposed to the air quality of a commercial environment," *Livestock Production Sci.*, vol. 93, no. 3, pp. 255-262, 2005.
- [15] A. Velarde, E. Fàbrega, I. Blanco-Penedo, and A. Dalmau, "Animal welfare towards sustainability in pork meat production," *Meat Sci.*, vol. 109, pp. 13-17, Nov. 2015.
- [16] J. Gadd, "*Modern pig production technology: A practical guide to profit*," Nottingham University Press: Nottingham, UK, 2011.
- [17] T. M. Brown-Brandl, J. A. Nienaber, R. Eigenberg, H. Xin, and M. D. Hayes, "Heat production of nursery and growing piglets," *Paper presented at the annual meeting for the Society of ASABE*, Kansas City, Missouri, Jul. 2013.

**신 학 중 (Hakjong Shin)**



2018년 2월 : 서울시립대학교 건  
축공학 학사  
2020년 2월 : 서울시립대학교 건  
축공학 석사  
2020년 2월~현재 : 서울시립대  
학교 건축공학 박사과정

<관심분야> 건물 에너지, 예측 모델, 디지털 트윈, 스마  
트팜. AI

**조 성 균 (Seng-Kyoung Jo)**



2004년 2월 : 한국항공대학교 항  
공통신정보공학 학사  
2006년 2월 : 한국과학기술원 전  
자공학 석사  
2021년 4월 : 다름슈타트 공대  
컴퓨터과학 박사  
2006년 3월~현재 : 한국전자통  
신연구원 책임연구원

<관심분야> 디지털 트윈, 스마트양식, 농축수산 ICT,  
IoT, AI

**김 세 한 (Se-Han Kim)**



1998년 2월 : 한국항공대학교 컴  
퓨터공학 학사  
2000년 2월 : 한국항공대학교 통  
신공학 석사  
2006년 7월 : 충남대학교 통신공  
학 박사 (수료)  
2000년 1월~2000년 10월 : 삼성

종합기술원 연구원  
2000년 10월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원  
(실장)  
<관심분야> 디지털 트윈, 스마트양식, 농축수산 ICT,  
IoT, AI