

## 포화 불균일성을 고려한 육계사 쿨링패드 시스템 성능 평가

### Evaluation of Performance on Cooling Pad System According to Non-uniform Saturation of in Broiler House

박진선<sup>a</sup> · 최락영<sup>b</sup> · 이세연<sup>b</sup> · Daniel Kehinde Favour<sup>b</sup> · 이채린<sup>b</sup> · 박지연<sup>b</sup> · 홍세운<sup>c,†</sup>

Park, Jinseon · Choi, Lak-Yeong · Lee, Se-Yeon · Favour, Daniel Kehinde · Lee, Chae-Rin · Park, Ji-Yeon · Hong, Se-Woon

#### ABSTRACT

Heat stress in broiler houses during the summer can lead to reduced feed intake and feed efficiency, ultimately resulting in decreased productivity. To mitigate heat stress, cooling pads utilizing the evaporative cooling effect have been introduced in commercial broiler houses. In this study, the performance of cooling pads in an actual broiler house was evaluated, and a wind tunnel equipment was designed to precisely analyze their performance. The results revealed that in the broiler house with long cooling pads, the uneven distribution of water led to a decrease in cooling efficiency. Specifically, cooling efficiency was 81% when the cooling pads were wet enough but decreased to 49.6% as the water supply to the cooling pads was not proper. Furthermore, wind tunnel experiments showed that as the airflow speed increased from  $0.64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  to  $1.86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the temperature reduction decreased from  $8.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $6.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . However, the mass transfer coefficient and heat transfer coefficient increased by  $0.0019 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$  and  $37.32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , respectively, indicating more active evaporation and greater heat removal due to higher airflow speed. Additionally, as relative humidity increased, the temperature reduction significantly decreased. When water was unevenly distributed across the cooling pad, the temperature reduction and cooling efficiency in areas without water were significantly reduced. These findings highlight the importance of maintaining uniform water distribution over the cooling pads to ensure desired cooling effects.

**Keywords:** Evaporative cooling pad; cooling efficiency; heat/mass transfer; broiler house; wind tunnel

## 1. 서론

육계사에서 환경 조절은 생산성과 직결되는 중요한 요소로, 특히 여름철 고온 환경에서 그 중요성이 더욱 강조된다. 가축 중 육계는 몸이 털로 덮여 있고 땀샘이 없다는 특징을 가지고 있어, 체내 열을 효율적으로 발산하지 못한다. 이러한 이유로 여름철에는 고온스트레스에 특히 취약하며, 이로 인해 적절한 사양 관리가 필수적이다 (Song and King, 2015). 고온스트레스에 노출될 경우, 육계의 건강을 악화시켜, 사료

섭취와 체중 증가량이 감소하며, 이는 결국 생산성 저하와 사료 효율 감소를 유발시킬 수 있다 (Teeter and Belay, 1996). 따라서 여름철 고온스트레스를 저감시키기 위해 육계사 내의 온도 조절이 중요하며, 이를 위해 내부 온도를 효과적으로 냉각할 수 있는 시스템의 도입은 육계의 성장률을 유지하는 데 필수적이다.

냉각 시스템은 공기를 냉각하는 원리에 따라 다양한 방식이 있으며, 이 중 증발냉각방식의 쿨링패드 시스템은 고온의 실외 공기를 냉각시켜 유입시키는 방법으로 경제적이며 효과적인 기술 중 하나이다 (Liao and Chiu, 2002). 쿨링패드 시스템은 다공성 매체가 물을 흡수하여 포화 된 상태를 유지할 때, 매체를 통과하는 공기가 물을 증발시키는 과정에서 증발 잠열에 의한 공기의 냉각을 유도하는 원리로 작동한다 (Jain and Hindoliya, 2011). 또한 냉각 효과가 최대로 이루어진다면 통과하는 공기의 건구 온도가 습구 온도에 가깝게 도달하게 된다 (Tejero-González and Franco-Salas, 2021). 유사한 원리로 공기 흐름 내에 물을 직접 분사할 수도 있으나, 쿨링패드와 같이 습한 매체에 공기를 통과시키며 증발 냉각 효과를 기대하는 것이 물을 공기 중에 분사하는 것에 비해 물의 증발 속도가 향상되어 냉각 효과가 향상될 수 있다고 알려져 있다 (Naveenprabhu and Suresh, 2020). 이와 같은 기능적 장점이

<sup>a</sup> Research Professor, AgriBio Institute of Climate Change Management, Chonnam National University

<sup>b</sup> Graduate Student, Department of Rural and Bio-systems Engineering & Education and Research Unit for Climate-Smart Reclaimed-Tideland Agriculture (BK21 four), Chonnam National University

<sup>c</sup> Associate Professor, Department of Rural and Bio-systems Engineering & Education and Research Unit for Climate-Smart Reclaimed-Tideland Agriculture (BK21 four), Chonnam National University

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-62-530-2183

E-mail: [hsewoon@jnu.ac.kr](mailto:hsewoon@jnu.ac.kr)

Received: October 05, 2024

Revised: October 25, 2024

Accepted: November 04, 2024

강조됨에 따라 쿨링패드의 냉각 효율을 평가하는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

Dağtekin 등은 실제 육계사에서 쿨링패드는 70%의 냉각 효율을 나타내어 실내 기온을 충분히 낮출 수 있지만, 상대습도가 높은 조건에서는 냉각 효율이 저하된다고 보고하였다 (Dağtekin et al., 2009b). 또한 쿨링패드 시스템을 활용할 경우, 실외 공기 온도를 평균 5.19 °C 낮출 수 있는 것으로 확인하였으며, 유입된 공기가 내부 공간을 통과하면서 터널팬으로 배출될 때까지 온도는 1.52 °C 정도 증가하는 것으로 나타났다 (Dağtekin et al., 2009a). 또한 쿨링패드에 공급되는 수온이 50 °C에서 10 °C로 낮아짐에 따라 쿨링패드에서 증발되는 물의 양이 73% 증가하여 냉각 효율이 향상되는 것을 확인하였는데, 이는 공급수의 수온이 쿨링패드 성능 개선에 기여할 수 있음을 시사한다 (Simmons and Lott, 1996). 또한 쿨링패드의 두께를 늘리면, 증발잠열과 공기의 전달 시간이 길어져 냉각 효율이 향상할 수 있다 (Liao and Chiu, 2002; Wu et al., 2009).

한편 쿨링패드의 공기 냉각 원리를 고려할 때 쿨링패드에 충분한 수량의 공급을 통한 균일한 포화도 유지는 쿨링패드 성능을 결정짓는 주요한 요인이 될 수 있다. 실제 농가에서 쿨링패드는 시설 방향에 따라 한 방향으로 길게 연결하여 시공하고, 용수공급을 위한 펌프는 한쪽 끝단에 설치하는 것이 일반적이다. 이와 같은 시공 방식과 펌프 용량 부족, 노즐 막힘 현상으로 쿨링패드 전면에 용수공급이 균일하게 적용되지 못할 우려가 있고, 이렇게 불균일한 포화도는 시스템의 냉각 효율을 급격히 저하시킬 수 있으나, 이에 대한 성능저하를 정량적으로 평가한 연구는 미흡한 실정이다. 이처럼 쿨링패드의 냉각 효율은 쿨링패드를 통과하는 공기 및 공급되는 물의 특성, 재료의 포화도 등 다양한 요인에 따라 변동할 수 있기 때문에 온습도 및 포화도 정도에 따라 쿨링패드 성능 변화를 측정하고, 개선안을 검토해 볼 필요가 있다.

쿨링패드 냉각 효율 측정은 실제 육계사를 대상으로 온습도의 변화 및 포화도의 차이가 발생할 때 측정하는 것이 타당하나, 육계사 내부에 발생한 난류로 인해 냉각된 공기가 기존의 실내 공기와 섞이거나, 가축과 건물 외벽으로부터 전도와 대류에 의한 열전달로 인하여 내부 온습도 분포가 달라질 경우 쿨링패드 시스템의 증발잠열에 의한 냉각 효과를 정확히 파악하기 어렵다. 여러 연구에서는 실제 축산 시설에서 쿨링패드의 성능 연구의 어려움을 보완하기 위하여 실내 풍동을 이용하여 쿨링패드의 증발잠열 현상을 보다 정확히 분석하고자 하였으며, 이를 통해 쿨링패드의 효과적인 적용 방안을 모색하고 있다 (Malli et al., 2011; Liao and Chiu, 2002; Simmons and Lott, 1996; Wu et al., 2009). 쿨링패드의 냉각 효율은 쿨링패드를 통과하는 공기의 성질 및 수온 등 다양한 요인에 따라

변동될 수 있으며, 효율이 가장 높은 상태를 실제 육계사에 적용할 경우 쿨링패드의 성능을 높일 수 있을 것이라 기대된다. 하지만, 실제 육계사에서 드러난 문제점인 쿨링패드의 불충분한 포화도에 따른 쿨링패드의 냉각 효과가 저하되는 정도에 대해서는 실내 실험에 의해서도 아직 정량적으로 검토된 바가 없어 육계사의 고온스트레스를 경감하기 위한 쿨링패드의 활용에 어려움이 많다.

따라서 본 연구에서는 실제 육계사에서 사용되고 있는 쿨링패드의 냉각 효과를 현장 실험과 실내 실험으로 평가하고, 쿨링패드의 불충분한 포화도에 따른 냉각 성능의 변화를 분석하고자 하였다. 현장 실험을 통해 육계사 내 쿨링패드의 현실적인 문제점을 조사하였으며, 실내 풍동 장치를 이용하여 공기의 온습도와 유속 및 물에 의한 포화 불균일도에 따른 쿨링패드의 성능 변화를 평가하였다. 또한 이러한 결과로부터 실제 육계사에서 쿨링패드의 효과적인 활용 방안을 모색하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 대상농장 위치 및 현황

대상 육계사는 전북특별자치도 남원시에 위치한 강제환기식 무창 육계사이며 육계사의 쿨링패드 및 환기시스템 위치는 Fig. 1과 같다. 육계사의 규모는 길이 87 m, 폭 14 m의 육계 3만 수 사육이 가능하다. 환기는 14개의 터널팬 (EM50, Munters, Sweden)과 5개의 크로스팬 (EM36, Munters, Sweden)으로 배기하며, 60여 개의 측면 입기구와 양측의 쿨링패드 600×1500×150 (L×H×T, mm)에서 공기를 유입한다.

### 2. 쿨링패드 시스템의 성능 평가 방법

#### 가. 현장 쿨링패드 시스템 운영 조건 및 성능 평가 방법

대상 농장에 운영 중인 쿨링패드는 24 m 전체 길이의 약 28%에 해당하며, 40장의 쿨링패드를 연결하여 시공하였다. 본 연구에서는 쿨링패드의 성능을 측정하기 위해 여름철 실외 기온이 35 °C 이상인 조건에서 실시하였으며, 14개의 터널팬을 모두 가동한 상태에서 수행하였다. 쿨링패드와 입기구의 조건은 기존 육계사의 환기 조건과 동일하게 수행하였으며, 입기구를 전부 열고, 음압이 0.09~0.15 inch-H<sub>2</sub>O를 유지하도록 쿨링도어를 열어 환기를 실시하였다. 음압은 내부 공기 유입은 원활하게 유지하면서 실내 가축의 생체 자극은 최소화하는 적정 값으로 농장의 규모와 사육두수 등을 반영하여 농장주의 경험을 바탕으로 설정된다. 용수공급 펌프는 시설 입구방향에 설치되어 있고, 용수공급은 5분 간격으로 작동

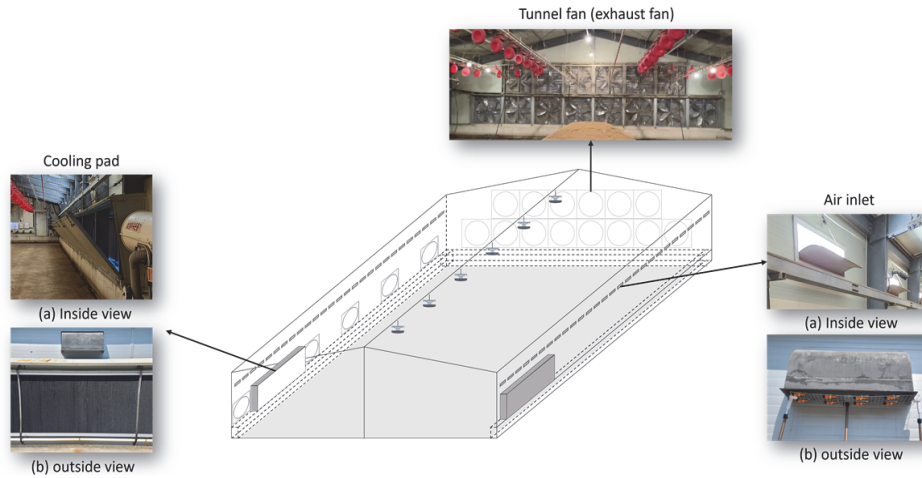


Fig. 1 Schematic view of a broiler house for cooling pad performance testing

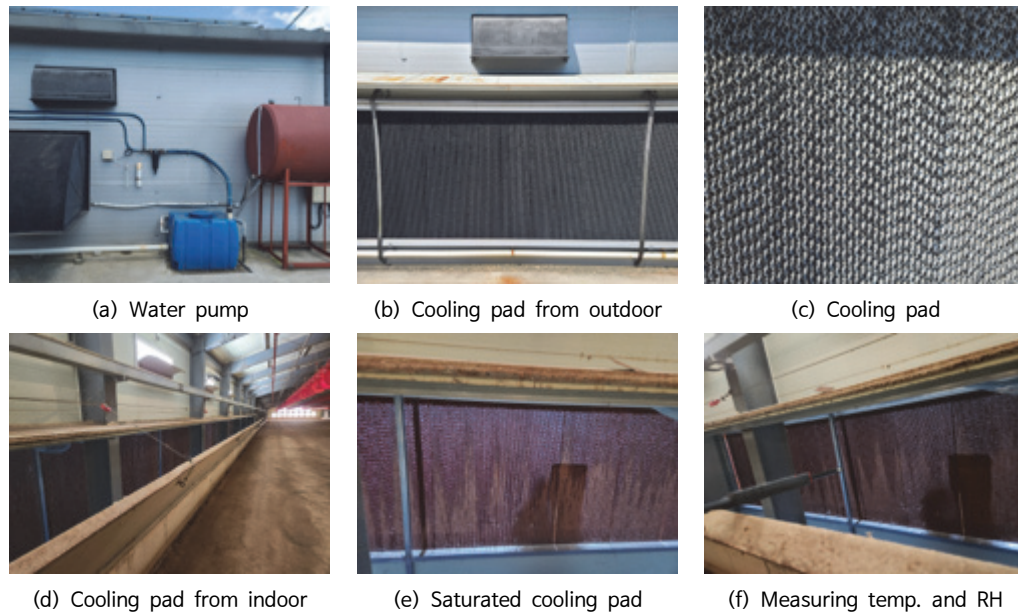


Fig. 2 Photos of cooling pad installation and experimental measurements

하며, 1분 동안 물을 공급하고, 4분은 물을 공급하지 않는 방식으로 작동한다. 측정은 10분동안 2주기의 용수공급 후 수행하였으며, 이때, 실외 공기의 습도는 37~39%이었으며, 온도는 34.2~38.9 °C로 나타났다.

쿨링패드 성능은 열화상 카메라 (Testo872, Testo SE & Co.KGaA, Germany)를 활용하여 포화 불균일도를 정량화하고, 내외부의 온습도 변화를 측정하여 냉각 효율과 기온 감소량을 산정하여 평가하였다. 쿨링패드 포화 불균일도의 정량화는 취득한 열화상 이미지를 영상 분석 프로그램인 Image J™ (NIH, Bethesda, MD, USA)를 이용하여 펌프로부터의 거리에 따라 포화 된 비율을 산정하였다. 또한 쿨링패드의 국부적

온도 저감효과 측정은 쿨링패드 전 구간 중 세 지점을 선정하여 측정하였으며, 풍량, 유입되는 실외 공기의 온습도, 쿨링패드를 통과한 공기의 온습도를 측정하여 쿨링패드의 냉각 효율과 기온 감소량을 비교하였다.

#### 나. 실내 풍동을 활용한 쿨링패드의 성능 평가

쿨링패드의 불균일한 포화상태를 재현하여 쿨링패드의 성능을 평가하기 위해 환경 조절이 가능한 실내 풍동을 Fig. 3과 같이 제작하여 실험을 수행하였다 (Laknizi et al., 2019). 쿨링패드의 증발 냉각 효과를 분석하기 위해 풍동에 쿨링패드와 물의 공급량을 조절할 수 있는 물 순환 장치를 연결하였고,



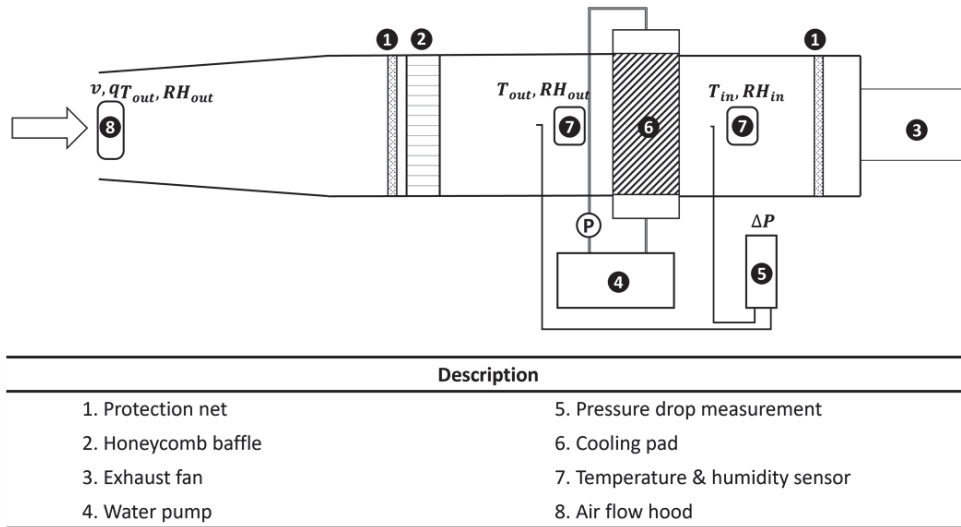


Fig. 3 Schematic view of the wind tunnel for cooling pad performance tests

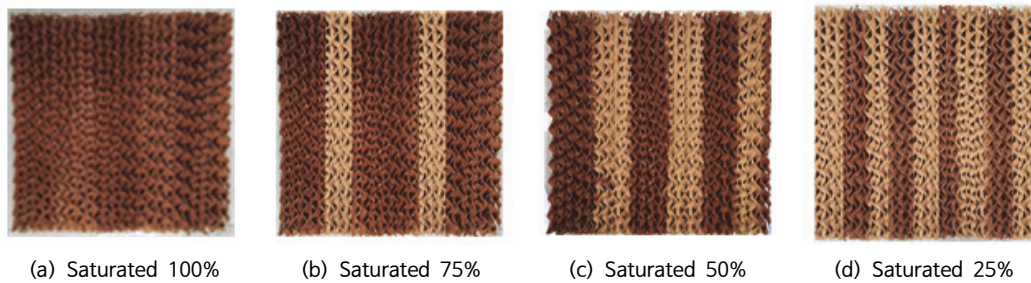


Fig. 4 Saturation scenarios for evaluating the cooling performance of non-uniformly saturated cooling pads

물 순환 장치에 연결된 파이프에는 일정한 간격으로 구멍을 만들어 쿨링패드 상단에 균일한 양의 물을 공급할 수 있도록 하였으며, 쿨링패드가 포화되어 표면에 머무르지 않고 흘러 내리는 물은 패드 아래의 저장조로 흘러 순환 공급되도록 설계하였다. 쿨링패드의 규격은  $1500 \times 600 \times 150$  (L×H×T, mm)이며, 본 연구에서는  $350 \times 350 \times 150$  (L×H×T, mm)으로 재단하여 활용하였다. 쿨링패드 전면과 후면에 온습도 측정 센서(Hobo MX2301A, Onset Computer Corp., USA)를 설치하여 쿨링패드 통과 전후의 온도와 상대습도를 측정하였다. 센서의 정확도는 온도  $\pm 0.2$  °C, 상대습도  $\pm 2.5\%$ 이며, 1초 간격으로 측정하였다. 풍동의 공기 흐름은 가변식 팬 (SLF-300D, Sung Il E-B Corp.)을 설치하여 풍속을 제어할 수 있도록 하였으며, 풍량계 (Testo 420, Testo SE & Co.KGaA, Germany)를 설치하여 실험 지속 시간동안 풍량과 풍속을 측정하였다. 가변식 팬 전면에 허니콤과 스크린 네트를 설치하여 풍동에 공급되는 바람의 난류를 줄이고 균일성을 높이하고자 하였다. 펌프는 DC 12 V 80 W (DWP-802U 7LPM, Motorbank, China) 용량을 활

용하였고, 분당 최대 토출량은  $6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 이다.

쿨링패드를 통과하는 공기의 유속은 외부 공기가 쿨링패드 시스템을 통과하는 속도가 너무 빠르면 물과 공기의 접촉 시간이 단축되어 물이 공기로부터 충분한 증발잠열을 흡수하지 못하고 냉각 효율이 감소하며, 남아있는 물에 의해 쿨링패드의 압력 손실도 커지게 된다 (Bruno and Liu, 2009; Malli et al., 2011). 이러한 이유로 쿨링패드를 통과하는 공기의 속도는 최소  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 최대  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 설계하도록 제한되기도 하였다 (Dağtekin et al., 2011). 따라서 본 연구에서는 통과 유속을  $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 설계하였다.

쿨링패드의 포화 불균일도에 따른 성능 평가를 위해 쿨링패드 포화 시나리오를 Fig. 4와 같이 구성하였다. 포화 불균일도를 구현하기 위해 전면을 100% 포화시킬 수 있는 용수량을 살포 노즐의 위치를 조정하여 면적의 25, 50, 75%에 살포하여 포화 불균일 상태를 모사하였다.

실내 실험 환경제어는 가습기 및 제습기를 활용하여 습도를 조절하였고, 온풍기를 이용하여 쿨링패드로 유입되는 공

기의 온도와 상대습도가 각각 30~35 °C, 30~80%의 범위로 외부 환경과 동일하게 유지하였으며, 이는 실제 육계사에서 쿨링패드 동작할 때의 온도와 상대습도의 범위와 유사하다. 각 실험은 안정적인 조건에서 5분 동안 1초 간격으로 측정하였다. 물 순환 장치와 가변식 팬을 이용하여 쿨링패드로 유입되는 물의 유량과 공기의 유속을 조절하였으며, 이를 통해 쿨링패드의 성능 지표인 온도 저감, 냉각 효율, 질량 전이, 열 전이를 분석하였다. 이러한 성능 지표들은 쿨링패드 통과 전·후의 온도와 습도를 측정하여 계산되었으며, 각 변수들이 쿨링패드의 증발 냉각 효과에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다.

### 3. 쿨링패드 성능 및 증발냉각 효과 산정 방법

쿨링패드 냉각 효율은 식 (1)과 같이 이론적인 최대 온도 감소량에 대한 실제 온도 감소량의 비로 나타낼 수 있다 (ASHRAE, 2001; Xu et al., 2015). 쿨링패드의 냉각 원리는 고온 건조한 공기가 물에 젖은 쿨링패드를 통과할 때, 쿨링패드 내 일부 수분이 공기의 흐름으로 증발하는데, 이때 물이 증발하는 데에 필요한 증발잠열을 쿨링패드를 통과하는 공기로부터 흡수한다. 이 과정에서 쿨링패드를 통과하는 공기는 빼앗긴 증발잠열만큼의 현열 변화를 일으키며 온도가 감소하게 되지만, 그에 상응하는 수증기 양만큼 습도가 상승하게 된다. 따라서 쿨링패드를 통과하는 공기의 상대습도가 100%인 경우, 쿨링패드를 적시고 있는 물이 증발하지 않게 되며, 통과하는 기온 변화도 일어나지 않는다. 이론적으로 쿨링패드는 공기의 습구 온도까지 온도를 낮출 수 있으며, 외부 공기의 상대습도가 높을 경우, 쿨링패드의 효율이 현저히 낮아지는 원인이며, 이를 식으로 정리하면 다음과 같다 (Alodan and Al-Faraj, 2005; Kittas et al., 2003).

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{1,wb}} \quad (1)$$

여기서,  $\eta$ 는 쿨링패드의 냉각 효율,  $T_1$ ,  $T_2$ 는 쿨링패드 통과 전과 후의 건구 온도 (°C),  $T_{1,wb}$ 은 습구 온도 (°C)를 의미한다. 습구 온도는 건구 온도 (°C)와 상대 습도 (RH, %)를 이용한 추정식으로 계산하였다 (Aziz et al., 2018; Rong et al., 2017).

$$T_{wb} = T_{atan}[0.151977 \cdot (RH + 8.313659)^{1/2}] + \text{atan}(T + RH) - \text{atan}(RH - 1.676331) + 0.00391838 \times RH^{3/2} \cdot \text{atan}(0.023101 \times RH) - 4.686035 \quad (2)$$

쿨링패드를 통과하는 습공기의 에너지와 질량 균형은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 식 (3)는 습공기의 제거된 열, 식 (4)는 증발된 물의 질량을 나타낸다.

$$q = \rho_a C_{pa} Q (T_1 - T_2) + \rho_a Q (W_1 (h_{g1} - h_{g2}) - W_2 (h_{g2} - h_{gwb})) \quad (3)$$

$$m_e = m_a (W_2 - W_1) \quad (4)$$

여기서,  $q$ 는 열전달량 (W),  $\rho_a$ 는 공기의 밀도 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $C_{pa}$ 는 건공기의 비열 ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $Q$ 는 쿨링패드를 통과하는 공기의 부피 유량 ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ),  $W_1$ ,  $W_2$ 는 쿨링패드 통과 전후의 습도비 ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{da}$ ),  $h_{g1}$ ,  $h_{g2}$ 는 쿨링패드 통과 전후의 포화 수증기의 엔탈피 ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $h_{gwb}$ 는 쿨링패드 통과 전의 습구 온도에서의 포화 수증기의 엔탈피 ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}_{g,wb}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ),  $m_e$ 는 쿨링패드에서 증발하는 물의 양 ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ),  $m_a$ 는 쿨링패드를 통과하는 공기의 질량 변화량 ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )을 나타낸다.

쿨링패드의 표면에서 발생하는 증발냉각 과정의 순 열전달과 물질 전달은 식 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = h_H A_s \Delta T \quad (5)$$

$$m_e = h_M A_s \Delta \rho_v \quad (6)$$

여기서,  $h_H$ 는 열전달 계수 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $h_M$ 는 질량 전달 계수 ( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ ),  $A_s$ 는 쿨링패드의 전체 표면적 ( $\text{m}^2$ )를 나타낸다.

$\Delta T$ 와  $\Delta \rho_v$ 는 대수 평균 차이 (Logarithmic mean difference)로 계산할 수 있으며, 식 (7) 및 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T = \frac{(T_2 - T_1)}{\ln((T_2 - T_{1,wb}) / (T_1 - T_{wb}))} \quad (7)$$

$$\Delta \rho = \frac{(\rho_{v2} - \rho_{v1})}{\ln((\rho_{v2} - \rho_{1,wb}) / (\rho_{v1} - \rho_{1,wb}))} \quad (8)$$

## III. 결과 및 고찰

### 1. 현장 쿨링패드 시스템 성능 평가 결과

대상 농장에 운영되고 있는 쿨링패드의 포화 불균일도 정량평가 결과는 Fig. 5와 같이 나타났다. 펌프가 가동된 후, 펌프와 거리가 가까운 곳에서 쿨링패드는 거의 모든 영역이 젖어있었으며, 펌프로부터 거리가 멀어질수록 물이 공급되지 않는 것으로 나타났다. 열화상 카메라 (Testo872, Testo SE & Co.KGaA, Germany)를 활용해 용수공급 후 쿨링패드를 촬영

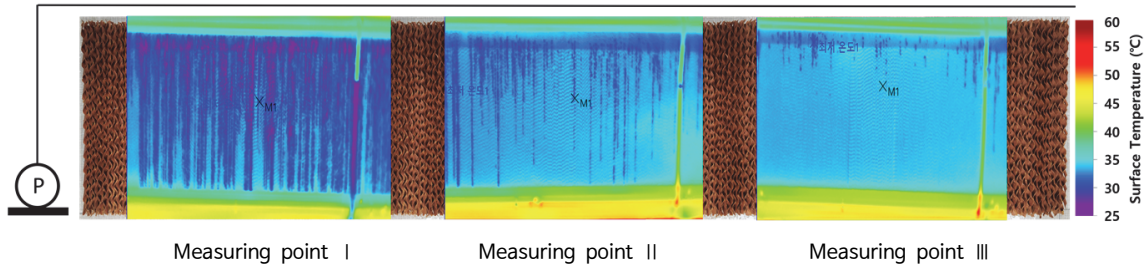


Fig. 5 Identification of non-uniform saturation of the cooling pads using thermal imaging camera, P indicates the water pump

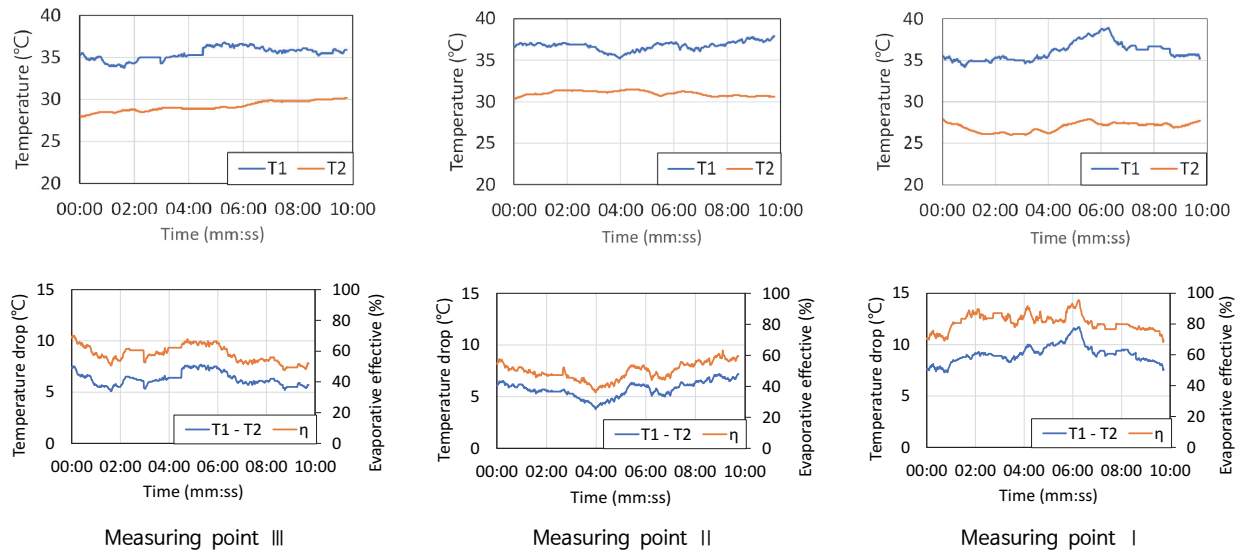


Fig. 6 Measurement of performance of cooling pad in a commercial broiler house,  $\eta$  is the cooling efficiency

하고, 영상 분석 프로그램을 이용하여 색상 정보에 따라 면적 비율을 산정한 결과, 측정 지점 세 곳 중 용수공급 펌프와 인접한 순서에 따라 포화도가 70.5%, 8.7%, 0.2%로 나타나 펌프와 거리가 멀어질수록 포화 효율이 급격히 저하되는 것으로 나타났다. 특히 펌프로부터 거리가 먼 지점에서는 쿨링패드가 거의 젖지 않는 것으로 나타났다.

펌프와의 거리에 따라 선정된 세 지점에서 측정한 결과는 Fig. 6과 같다. 펌프와 인접한 측정 지점 I에서 외기의 쿨링패드 통과 전후의 온도 감소 및 냉각 효율은 각각 7.3~11.7 °C와 68.2~95.5%로 나타났으며, 펌프와 가장 멀리 떨어진 측정 지점 III에서는 각각 3.8~7.3 °C와 36.0~63.3%로 나타났다. 펌프와의 거리가 멀어질수록 쿨링패드 포화도가 감소하며 냉각 효율 또한 저하된 것으로 판단된다. 쿨링패드의 공기 냉각 원리에 따르면 쿨링패드가 젖지 않을 경우, 통과 전후의 온도 감소가 없으며, 냉각 효율이 나타나지 않아야 하지만, 외기가 쿨링패드를 통과 후 온도가 낮은 실내 공기와 섞이면서 냉각

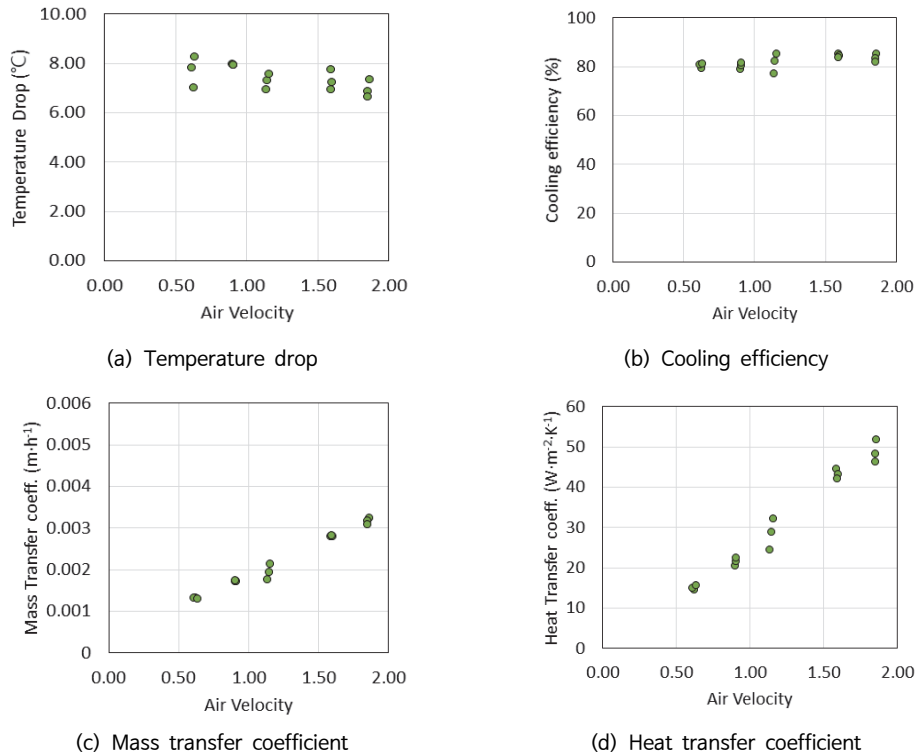
효율이 산정된 것으로 판단된다.

## 2. 실내 풍동에서 쿨링패드의 성능 평가 결과

용수공급 변화에 따른 쿨링패드의 성능 평가 결과는 Table 1과 같다. 펌프 유량이 1.50 L · min<sup>-1</sup>일 때 가장 높은 냉각 효율을 보였는데 다른 두 유량에서도 냉각 효율은 조금 낮지만 높은 냉각 효율을 보여 공급된 유량에 따라 큰 차이를 보이지는 않았다. 펌프 유량이 0.35 L · min<sup>-1</sup>에서 1.50 L · min<sup>-1</sup>으로 증가한 경우, 모든 관련 변수가 증가하면서 쿨링패드의 효율이 증가하는 경향을 보였지만, 2.50 L · min<sup>-1</sup>의 최대 펌프 유량 조건에서 오히려 쿨링패드의 효율이 감소하는 경향을 보였다. 이는 최대 펌프 유량 조건에서 쿨링패드 표면에 흐르는 물의 양이 많아짐에 따라, 쿨링패드를 통과하는 공기가 저항을 더 크게 받으며, 쿨링패드를 통과하는 공기의 양이 줄어드는 것으로 판단된다. 또한 쿨링패드에 공급되는 물의 양에 비해 쿨링패드에서 물이 증발하는 양 ( $m_e/\rho_w = 0.0166$  L ·

**Table 1** Cooling efficiency of the cooling pads according to water supply amount

Q (L · min <sup>-1</sup> )	Temperature drop (°C)	Cooling efficiency (%)	Mass transfer coefficient (m · h <sup>-1</sup> )	Heat transfer coefficient (W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> )
0.35	7.32	83.16	0.0022	31.20
1.50	7.59	85.47	0.0022	33.57
2.50	7.26	81.19	0.0019	28.37

**Fig. 7** Cooling effect according to air velocity

min<sup>-1</sup>)이 극히 적었다. 이는 쿨링패드의 모든 표면이 이미 충분히 젖어있는 상태인 경우, 펌프 유량의 변화는 쿨링패드의 효율에 큰 영향을 미치지 않으며, 오히려 다른 요인들이 온도 저감효과에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

쿨링패드를 통과하는 공기의 유속에 따른 쿨링패드 효율은 Fig. 7과 같다. 유속이 증가함에도 온도 저감량 및 냉각 효율은 일정한 수준을 나타냈고, 질량 전달계수는 0.0013 m · h<sup>-1</sup>에서 0.0032 m · h<sup>-1</sup>으로, 열전달 계수는 14.3 W · m<sup>-2</sup> · K<sup>-1</sup>에서 51.6 W · m<sup>-2</sup> · K<sup>-1</sup>으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 유속이 증가함에 따라 쿨링패드를 통과하는 공기량 또한 증가하지만, 온도 감소량은 유사한 수준을 보여 냉각 효율 또한 80% 전후의 값을 보인 것으로 판단되고, 유량이 증가하여도 일정 수준의 온도 저감 효과를 보인 것은 Fig. 7 (c), (d)에서 나타난 바와 같이 질량전달 및 열전달이 더욱 활발히 일어났기 때문인 것

으로 분석된다.

또한 환경 변화에 따른 쿨링패드 성능을 평가하기 위해 제습과 가습하여 상대습도를 제어하고, 온도 31.0~33.4 °C, 상대습도 45~76% 범위에서 쿨링패드의 성능을 평가하였다. 그 결과 Fig. 8과 같이 쿨링패드에 유입되는 공기의 상대습도가 증가할수록 온도 감소량은 7.6 °C에서 2.6 °C까지 감소하여 냉각 효과가 낮아지는 것을 확인하였고, 이와 대비하여 Fig. 9 (a)에서 나타난 바와 같이 통과하는 공기의 뚜렷한 온도 변화에도 온도 저감량의 뚜렷한 경향을 보이지 않았고, 유입 공기의 온도와 상관없이 Fig. 9 (b)에서 나타난 바와 같이 일정 수준의 냉각 효율을 보였으며, 질량전달 또한 유사한 수준을 나타내 증발잠열에 의한 온도 감소량은 상대습도에 지배적이라고 판단된다.

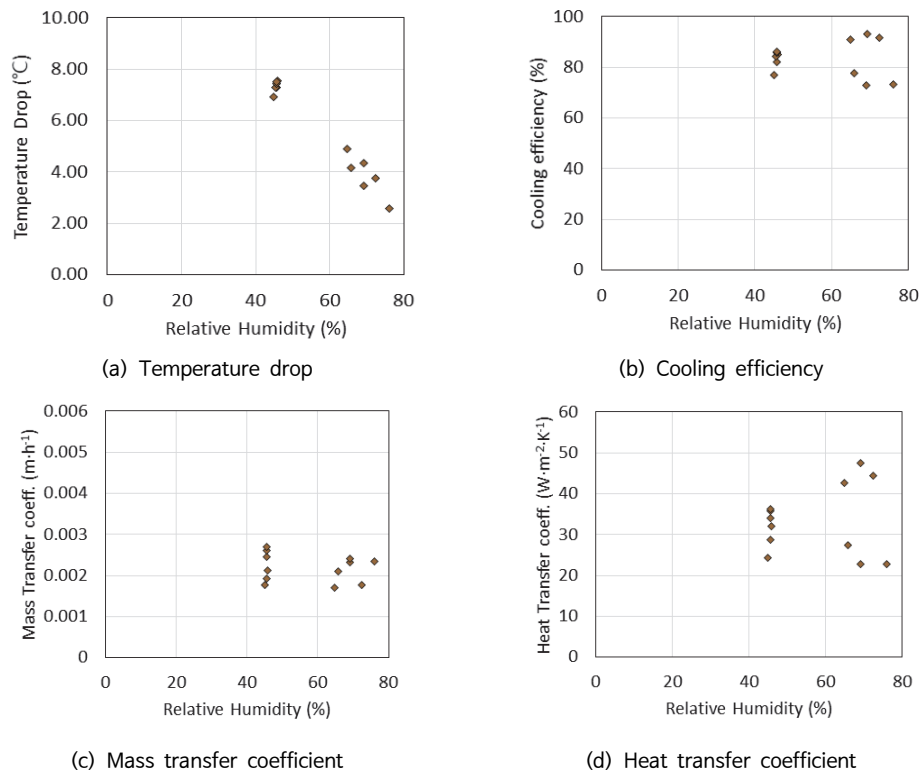


Fig. 8 Cooling effect according to relative humidity

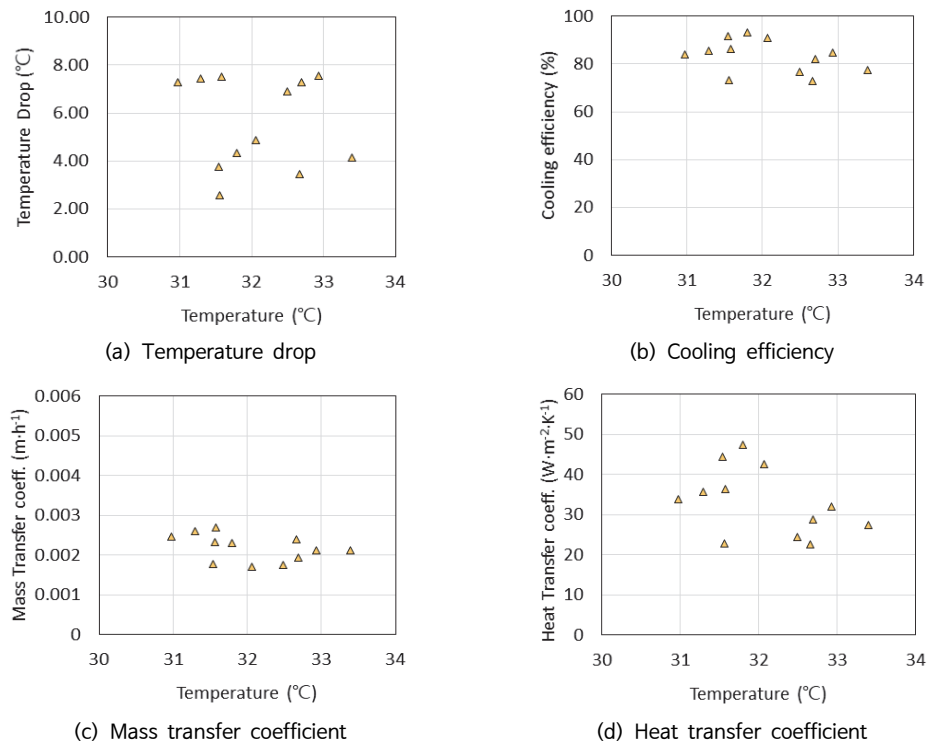


Fig. 9 Cooling effect according to temperature



**Table 2** Cooling efficiency according to non-uniform saturation of cooling pads

Saturated ratio (%)	Temperature drop (°C)	Cooling efficiency (%)	Mass transfer coefficient ( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )	Heat transfer coefficient ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ )
25	4.766	46.455	0.001	11.530
50	6.326	61.612	0.002	17.637
75	6.795	73.261	0.002	24.530
100	7.885	76.770	0.002	26.977

쿨링패드의 불균일한 물 공급에 따른 성능 평가 결과는 Table 2와 같다. 현장에서 빈번하게 발생하는 쿨링패드의 물이 불균일하게 도포되어 있는 경우를 모의하였고, 포화도에 따른 냉각 효율을 평가하였다. 포화도 100%에 비해 25%에서는 온도 저감량이 약 40% 저하되는 것으로 나타났고, 냉각 효율 또한 40% 가량 낮게 산정되었다. 쿨링패드가 물에 포화된 면적이 전체 면적의 25%로 줄었다 하더라도 냉각 효과는 이보다 적게 감소하였는데, 이는 쿨링패드에 공급된 물이 연직 하향으로 이동하는 것이 아니라 사선방향으로 전달되면서 실제로는 더 많은 면적에 물이 공급되었기 때문으로 추정된다. 포화도가 100%에서 25%로 줄어들면서 열전달 계수는 57% 낮게 평가되어 동일 시설물에서 포화도에 따라 현저한 효율 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 외관 상의 포화도와 실제 쿨링패드 내부의 물 공급 상태는 다를 수 있으므로, 본 실험 결과로부터는 외관상의 포화도가 75% 이상은 유지되어야 100% 포화되었을 때와 유사한 기온 저감효과 및 냉각 효율을 나타낼 것으로 판단된다. 따라서 적절한 설계와 시공, 시설물 유지관리를 통해 쿨링패드를 올바르게 사용하는 것이 육계사 고온스트레스 관리 및 내부 온도 제어에 경제적이고 효과적인 방법임을 확인하였다. 또한 쿨링패드 증발냉각 성능을 최적화 하고, 실제 농가에 능동적인 적용을 건인하기 위해 용수의 순환시스템 개발 및 분사장치의 개선이 뒷받침 되어야 할 것으로 사료된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 여름철 육계사에서 사용되는 쿨링패드의 성능을 평가하기 위해 실제 육계사에서 쿨링패드를 통과하는 공기의 온도 감소량, 냉각 효율을 측정하고 분석하였으며, 실내 풍동을 활용하여 펌프의 유량, 통과하는 공기의 유속, 온습도, 쿨링패드의 포화 불균일도에 따라 쿨링패드의 성능을 평가하였다.

1. 실제 육계사에서 길이가 긴 쿨링패드를 설치한 경우, 설계 및 시공 오류, 파손, 관리 소홀 등으로 용수공급의

불균일성이 발생하고, 이로 인해 각 영역별로 쿨링패드 포화도의 차이가 나타나는 것을 확인하였고, 측정 결과 포화 불균일도에 따라 냉각 효율이 평균적으로 약 30% 차이를 보였다. 이는 쿨링패드가 본래의 잠열 증발 효과를 충분히 발휘하지 못하도록 하여, 육계사 내 적정 온도 유지에 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

2. 실내 풍동을 이용하여 쿨링패드의 성능을 온도 감소량, 냉각 효율, 질량 전달계수, 열 전달 계수를 이용하여 분석 및 평가하였다. 쿨링패드의 물의 용수공급량은 쿨링패드 성능에 유의미한 영향을 미치지 않았으며, 통과하는 공기의 유속이 증가할수록 온도 감소량은 감소하였으나, 냉각 효율에는 차이가 없었다. 반면, 질량 전달계수와 열 전달 계수는 풍속이 증가함에 따라 상승하는 경향을 보였다. 또한, 온습도에 따른 비교 결과, 습도가 증가함에 따라 온도 감소량과 증발 전달계수는 모두 감소한 반면, 나머지 변수들은 유의미한 변화를 나타내지 않았다. 온도가 증가함에 따라 쿨링패드는 선형적인 성능 분포를 보이지 않았다.
3. 또한 육계사에서와 같이 물이 불균일하게 분포된 상황에서 쿨링패드의 성능을 평가하였다. 포화도에 따른 냉각 효율을 평가하였다. 포화도 100%에 비해 25%에서는 온도 저감량이 약 40% 저하되는 것으로 나타났고, 냉각 효율 또한 40% 가량 낮게 산정되었다. 열전달 계수는 57% 낮게 평가되어 동일 시설물에서 포화도에 따라 현저한 효율 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 쿨링패드의 활용 시, 외관상의 포화도가 약 75% 이상은 유지되어야 쿨링패드의 최대 냉각 효율을 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.
4. 본 연구를 통해 육계사 고온스트레스 저감을 위한 관리 방법으로 쿨링패드의 도입이 경제성을 확보하고, 온도 저감에 효과적인 방법임을 확인하였고, 향후 용수 사용 절감을 위한 물 순환시스템 및 분사장치 개선을 위한 연구가 요구된다.

본 연구를 통해 육계사에서 쿨링패드를 사용한 냉각 효과

를 명확히 규명할 수 있었다. 특히, 현재 불균일한 물의 공급으로 인한 쿨링패드의 성능이 저하 될 수 있음을 확인하였다. 쿨링패드의 물 공급 방식 및 유지 관리를 최적화하여 실제 현장에서의 효율성을 높이는 추가 연구가 필요할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 농림축산식품부 및 과학기술정보통신부, 농촌진흥청의 재원으로 농림식품기술기획평가원과 재단법인 스마트팜연구개발사업단의 스마트팜다부처패키지혁신기술개발사업 (세부과제번호: RS-2021-IP421024)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## REFERENCES

- Alodan, M. A., and A. A. Al-Faraj, 2005. Design and evaluation of galvanized metal sheets as evaporative cooling pads. *J. King Saud Univ.* 18: 9-18.
- ASHRAE Standard ANSI/ASHRAE 133-2001, 2001. Method of testing direct evaporative air coolers, 24.
- Aziz, R. A., N. F. Zamrud, and N. Rosli, 2018. Comparison on cooling efficiency of cooling pad materials for evaporative cooling system. *Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology* 1: 61-68.
- Bruno, F., and M. M. Liu, 2009. Technical background research on evaporative air conditioners and feasibility of rating their water consumption. University of South Australia, Adelaide, Australia.
- Dağtekin, M., C. Karaca, and Y. Yildiz, 2009a. Long axis heat distribution in a tunnel-ventilated broiler house equipped with an evaporative pad cooling system. *Animal Production Science* 49(12): 1125-1131.
- Dağtekin, M., C. Karaca, and Y. Yildiz, 2009b. Performance characteristics of a pad evaporative cooling system in a broiler house in a Mediterranean climate. *Biosystems Engineering* 103: 100-104.
- Dağtekin, M., C. Karaca, Y. Yildiz, A. Başçetinçelik, and Ö. Paydak, 2011. The effects of air velocity on the performance of pad evaporative cooling systems. *African Journal of Agricultural Research* 6(7): 1813-1822.
- Jain, J. K., and D. A. Hindoliya, 2011. Experimental performance of new evaporative cooling pad materials. *Sustainable Cities and Society* 1(4): 252-256.
- Kittas, C., T. Bartzanas, and A. Jaffrin, 2003. Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. *Biosystems Engineering* 85(1): 87-94.
- Laknizi, A., A. Ben Abdellah, M. Faqir, E. Essadiqi, and S. Dhimdi, 2019. Performance characterization of a direct evaporative cooling pad based on pottery material. *International Journal of Sustainable Engineering* 14(1): 46-56.
- Liao, C. M., and K. H. Chiu, 2002. Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative cooling pads in Taiwan region. *Building and Environment* 37: 177-187.
- Malli, A., H. R. Seyf, M. Layeghi, S. Sharifian, and H. Behraves, 2011. Investigating the performance of cellulosic evaporative cooling pads. *Energy Conversion and Management* 52(7): 2598-2603.
- Naveenprabhu, V., and M. Suresh, 2020. Performance enhancement studies on evaporative cooling using volumetric heat and mass transfer coefficients. *Numerical Heat Transfer* 1-20.
- Rong, L., P. Pedersen, T. L. Jensen, S. Morsing, and G. Zhang, 2017. Dynamic performance of an evaporative cooling pad investigated in a wind tunnel for application in hot and arid climate. *Biosystems Engineering* 156: 173-182.
- Simmons, J., and B. Lott, 1996. Evaporative cooling performance resulting from changes in water temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 12(4): 497-500.
- Song, D., and A. King, 2015. Effects of heat stress on broiler meat quality. *World's Poultry Science Journal* 71(4): 701-709.
- Teeter, R. G., and T. Belay, 1996. Broiler management during acute stress. *Animal Feed Science and Technology* 58: 127-142.
- Tejero-González, A., and A. Franco-Salas, 2021. Optimal operation of evaporative cooling pads: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151.
- Wu, J. M., X. Huang, and H. Zhang, 2009. Theoretical analysis on heat and mass transfer in a direct evaporative cooler. *Applied Thermal Engineering* 29(5-6): 980-984.
- Xu, J., Y. Li, R. Z. Wang, W. Liu, and P. Zhou, 2015. Experimental performance of evaporative cooling pad systems in greenhouses in humid subtropical climates. *Applied Energy* 138: 291-301.