

무창돈사용 고성능 스마트 환기 시스템

윤덕용
공주대학교 전기전자제어공학부

Advanced Smart Ventilation System for Windowless Pig House

Duck-Yong Yoon
Division of Electrical, Electronic and Control Engineering, Kongju National University

요약 본 논문에서는 무창돈사의 환기 제어용으로 사용하는 고성능 스마트 환기팬을 개발하고 그것의 제어 성능 및 효과를 시험하였다. 현재까지 사용해온 대부분의 환기팬은 단순히 돈사 내부의 온도를 기준으로 팬 날개를 구동하는 전 동기의 회전속도를 제어하는 방식으로 되어 있는데, 이러한 방식은 밤과 낮으로 변하는 돈사 실내외의 온도차나 외부의 바람에 의하여 발생하는 환기팬 통풍구에서의 음압을 전혀 고려하지 않고 단순히 실내 온도에 따라 팬 날개의 회전속도를 제어하므로 최적의 올바른 환기가 불가능하다. 본 논문에서 제안하는 고성능 스마트 환기팬은 실제 환기량을 측정하는 센서 날개를 추가하고 이를 사용한 피드백 제어를 수행함으로써 어떤 상황에서도 지정된 목표 환기량을 정확하게 제어하는 특성이 있다. 개발된 환기 제어 시스템을 사용하면 축사에서 항상 건강한 돼지를 사육함으로써 전염병이나 구제역과 같은 질병에 강하게 되어 현재 우리나라의 평균 MSY 18.7두를 25두 이상으로 높일 수 있고, 관리자의 노동력은 물론이고 겨울철의 난방비나 여름철의 냉방비를 절약할 수 있으며, 돼지의 성장 속도가 빨라짐으로써 양돈농가의 생산비를 크게 낮출 수 있다.

Abstract This study developed a high-performance smart ventilation fan for windowless pig houses and tested its control performance. Most of the ventilation fans that have been used so far control the rotational speed of the motor driving the fan blades based on the temperature inside the pig house. However, optimal and correct ventilation is impossible because the rotation speed is controlled only according to the room temperature. On the other hand, the ventilation system should also consider the negative pressure in the ventilation fan hole. The advanced smart ventilation system proposed in this paper has the characteristics of accurately controlling the specified target ventilation amount in any situation by performing feedback control. If this ventilation control system is used, healthy pigs will always be raised in the windowless pig house, strong against diseases. The production of healthy pigs will also result in the current average MSY of 18.7 in Korea being raised to more than 25 or more. And using the present system, the production cost of pig farms can be greatly reduced by increasing the growth rate of pigs.

Keywords : Windowless Pig House, Ventilation Fan, Single-Phase Induction Motor, TRIAC, MSY

*Corresponding Author : Duck-Yong Yoon(Kongju National University)
email: yoon3m@kongju.ac.kr
Received November 15, 2021
Accepted February 4, 2022

Revised December 21, 2021
Published February 28, 2022

1. 서론

우리나라의 국민소득 증가와 삼겹살을 좋아하는 국민적 특성으로 인하여 돼지고기에 대한 수요가 매년 큰 폭으로 증가하여 왔는데, 이에 따라 양돈농가가 늘어나고 사육 규모가 매우 커지는 특징을 보이고 있다. 또한, 생산비와 노동력을 절감하기 위하여 과거의 개방형 돈사는 거의 사라지고 무창돈사를 사용한 밀식 사육이 압도적인 주류를 이루게 됨으로써 환기의 중요성이 더욱 높아지고 있으며, 따라서 돈사 내부의 환경을 적정하게 유지하기 위한 환기는 과거의 자연환기 방식에서 환기팬을 사용한 기계식 강제환기 방식으로 바뀌어 왔다[1].

환기는 돼지에게 항상 신선한 공기를 공급해주고 돈사의 내부 온도와 습도를 적정하게 유지하며, 먼지와 냄새를 제거하는 효과까지 있어서 돼지의 건강한 생육을 위하여 매우 중요한 필수 요소이다. 특히 겨울철에는 이를 난방기구와 함께 사용하여 적정한 실내 온도 유지와 에너지 절약을 꾀하는 것이 중요하며, 여름철에는 환기량을 높여서 돈사 내부의 열을 외부로 배출함으로써 돼지가 더위에 피해를 입지 않고 냉방 에너지를 절감하도록 하는 것이 중요하다[2]. 또한, 봄과 가을에는 기온의 일교차가 심하므로 하루의 시간대별로 환기량을 적절히 조절하여 돼지가 온도 충격으로 인하여 호흡기 질병에 걸리지 않도록 정밀하고 안정적인 환기 제어가 필요하다.

양돈농가의 생산성을 표현하는 지수로 모돈당 연간 출하두수(MSY: Marketed-pigs per Sow per Year)가 있는데, 2017년을 기준으로 세계 최고 수준의 축산국인 덴마크는 31.3두이고 네덜란드는 28.8두인데 비하여 같은 해 우리나라의 평균 MSY는 18.7두에 불과하다[3]. 이와 같은 양돈 농가의 생산성을 세계 수준으로 끌어올리는데 매우 중요한 것이 바로 환기이다. 자돈일 때부터 좋은 환경에서 건강하게 기른 돼지는 각종 질병에 강하며 구제역과 같은 전염병이 돌더라도 쉽게 감염되지 않게 됨으로써 폐사율을 낮추고 MSY를 축산 선진국 수준으로 높일 수 있다. 특히 무창돈사에서 환기의 중요성은 누구나 잘 알고 있지만 제대로 환기를 제어할 수 있는 기술이나 장비는 국내외적으로 거의 없는 실정이다.

돼지는 두꺼운 피하지방층을 가지고 있기는 하지만 다른 가축에 비해 피부에 털이 적어서 온도에 상당히 민감한 동물이다. 축사의 온도가 적정하지 않거나 급격히 변동하면 단기적으로는 돼지가 감기에 걸리기 쉽고, 장기적으로는 체력이 약해져서 각종 질병이 발생하고 결국 폐사율이 높아지게 된다[4]. 반대로, 환기 제어가 적절하

여 건강하게 사육되는 돼지는 폐사율이 낮으며 먹는 사료량이 증가하고 성장 속도가 빨라져서 출하 시기를 앞당기므로 축산농가의 생산성이 높아지고 소득을 높일 수 있다. 돼지의 사육 단계별 적정 온도는 Table 1과 같다 [5].

Table 1. Proper temperature according to pig-breeding stage

Breeding stage	Optimal temperature [℃]	Required temperature range [℃]
Feeding sow	16	10~22
Newborn piglet	33	26~38
Weaning piglet	28	26~30
Growing pig	24	22~27
Fed pig	22	20~24
Pregnant pig	18	10~22
Breeding pig	16	10~20

현재까지 사용해오고 있는 무창돈사용 환기팬은 이런 점을 고려하여 돈사 내부의 온도를 측정하고 이를 바탕으로 팬 날개를 구동하는 전동기의 회전속도를 제어하고 있다. 저가형 환기팬에서는 수백W 정도의 단상 유도전동기를 널리 사용하고 이것의 속도 제어기에는 주로 TRIAC(TRIode AC switch)을 이용한 전압제어 방식을 사용하며, 고가형 제품에서는 수백 와트에서 수kW 정도의 3상 유도전동기를 사용하고 이것의 속도 제어기로는 대부분 가격이 높은 3상 인버터를 사용한다. 이런 모든 환기팬은 단순히 돈사 내부에서 측정된 온도를 바탕으로 전동기의 회전속도를 제어함으로써 온도가 낮아지면 전동기의 회전속도를 감소시키고 온도가 높아지면 전동기의 회전속도를 증가시키는 방식으로 동작한다.

그러나, 이러한 방식의 환기팬으로는 원리적으로 돼지에게 적절한 환기를 할 수 없다. 실내 온도 정보만으로는 현재의 적정한 환기량을 알 수가 없으며, 단순히 전동기의 회전수를 높이거나 낮추는 방법으로는 적정한 환기를 수행할 수가 없기 때문이다. 가장 중요한 것은 축사 내부의 온도와 외부의 온도 차이에 의하여 환기팬 통풍구를 통하여 압력이 발생하므로 동일한 실내 온도에 대해서도 외부 온도가 달라지면 적절하게 전동기의 회전속도가 달라져야 한다는 것이다. 예를 들면 실내 온도가 동일하더라도 햇빛에 의하여 외부 온도가 높아지는 낮 시간과 외부 온도가 크게 떨어지는 밤 시간에는 환기팬 통풍구에 작용하는 압력이 상당히 달라지므로 단순히 실내 온도 정보만을 이용하여 동일한 속도로 전동기를 제어해서는

실제 환기량이 전혀 다르게 나타난다. 즉, 외부 기온이 높은 낮에는 실내의 공기가 밖으로 배출되는 환기가 아무 문제 없이 수행될 수 있지만, 외부 기온이 낮아지는 밤에는 공기의 밀도가 높은 외부에서 공기의 밀도가 낮은 실내 방향으로 공기가 이동하면서 강력한 음압(negative pressure)이 작용하므로 낮보다 전동기의 회전속도를 더 높이지 않으면 환기는커녕 오히려 외부의 찬 공기가 실내로 흘러들어오는 현상이 발생할 수 있다. 또한, 외부에서 바람이 불지 않을 때 태풍처럼 강한 바람이 불 때는 환기팬 통풍구에 작용하는 압력이 전혀 다르게 되므로 역시 동일한 실내 온도에 대하여 동일한 속도로 전동기를 제어해서는 원하는 환기가 수행되지 않는다. 이처럼 외풍이 센 경우에도 환기구에 음압이 발생하여 환기팬 전동기가 회전하더라도 외부의 공기가 실내로 유입되는 현상이 발생할 수 있다.

이러한 문제를 해결하는 유일한 방법은 단순히 실내 온도에 따라 전동기의 속도를 제어할 것이 아니라, 제어가 목표 온도와 현재의 실내의 온도를 가지고 목표 환기량을 결정하고, 실제로 환기팬을 통하여 배출되는 유량을 측정하여 이것이 원하는 목표 환기량으로 정확히 제어되도록 상황에 따라 전동기의 속도를 가변해야 한다. 즉, 동일한 실내 온도에 대해서도 실내와 실외의 온도차가 적거나 외풍이 작용하지 않아서 음압이 거의 없을 때는 환기팬을 낮은 회전속도로 제어해도 충분하지만, 실내외의 온도차가 크거나 외풍이 심하여 환기팬 날개에 강력한 음압이 작용하는 경우에는 그만큼 더 전동기의 회전속도를 높여야만 실제로 필요한 환기가 이루어진다. 따라서, 이러한 제어를 위해서는 반드시 환기팬 통풍구에 유량 센서를 설치하여 사용해야 한다.

본 논문에서는 유량 센서를 갖는 환기팬을 특허로 등록한 특허권자로부터 제품 개발 의뢰를 받아서[6,7] 실제 환기량을 제어하는 무창돈사용 고성능 스마트 환기팬을 개발하고, 이것의 제어 성능과 적용 효과를 시험하여 유효성을 검증하였다.

2. 스마트 환기팬의 구조와 동작

2.1 단독형 환기팬의 구조

본 논문에서는 특허[6]에서 제안하는 Fig. 1과 같이 스마트 환기팬의 구조를 설계 제작하였다. 직경 498mm의 원통형 스테인레스(40)에 상부에 단상 유도전동기(10)를 사용하여 구동하는 팬 날개(22)를 설치하고, 하부

에 공기의 흐름에 따라 회전속도가 쉽게 변하는 바람개비형 센서 팬 날개(32)를 설치하여 유량을 측정한다. 이들 팬에는 각각 회전속도를 측정하기 위한 로터리 엔코더(24, 34)가 설치된다.

원통의 외부에는 환기팬 제어기(50)가 붙어 있고 이 제어기에는 220V 단상 교류전원(53)과 온습도 센서 및 CO2 센서(52)가 케이블로 길게 연결된다. 모든 제어 상태는 멀리서도 볼 수 있도록 사이즈가 큰 7세그먼트 LED에 표시하며, TV 리모컨으로 사용자가 먼 거리에서도 제어 기능을 설정할 수 있다.

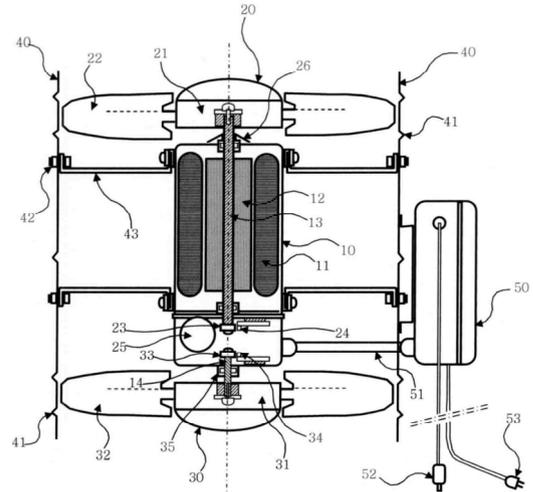


Fig. 1. Structure of ventilation fan for windowless pig house

Fig. 2에 보인 것처럼 이 환기팬은 축사의 천장을 뚫고 굴뚝처럼 지붕으로 나오도록 설치하는데, 이러한 굴뚝형(chimney type) 환기팬은 기존의 벽체형(wall type)에 비하여 실내의 공기를 고르게 제어하는데 더 유리하다는 구조적인 장점을 가진다.

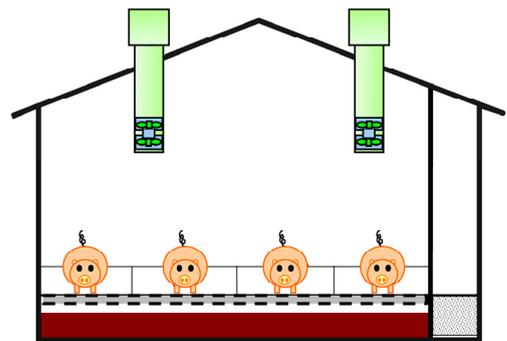


Fig. 2. Chimney-type ventilation fan for windowless pig house

2.2 단독형 환기팬의 제어

여기서 개발한 단독형 스마트 환기팬의 제어 블록도는 Fig. 3과 같다. 8비트 마이크로프로세서는 설정된 목표 온도와 온도 센서에서 측정한 실제 온도의 차이를 계산하여 목표 환기량을 결정하며, 센서 날개의 환기량 측정 값을 피드백하여 지시된 목표 환기량 값과 비교하고 TRIAC으로 전압을 가변하여 전동기의 회전속도를 제어한다.

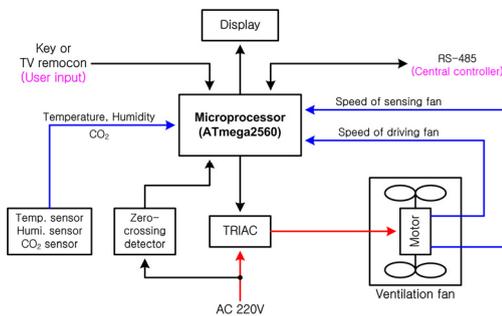


Fig. 3. Control block diagram of ventilation fan for windowless pig house

이 환기팬에서 제어의 핵심은 Fig. 4와 같이 환기 제어 곡선(ventilation control curve)을 따라서 적절한 목표 환기량(target ventilation)을 결정하고 센서 날개에서 피드백한 실제 환기량이 목표 환기량과 같아지도록 제어하는 것이다. 여기서 목표 온도(target temperature)는 Table 1처럼 돈사 내부에서 일정하게 유지하고 싶은 온도값으로서 사용자가 설정하며, 온도 센서에서 실시간으로 측정된 현재의 실내 온도(current temperature)와 목표 온도의 차이를 이 제어 곡선에 적용하여 목표 환기량을 결정한다. 환기량은 전혀 환기를 수행하지 않는 상태를 0%로 하고 전동기가 정격속도인 1678rpm으로 회전하고 실내외의 압력 차이가 없어서 센서 날개가 최고 속도인 1200rpm으로 회전하는 환기 상태를 100%로 하여 제어하며, 전체 온도 변동 영역에서 최소로 제어할 환기량(minimum ventilation)과 최대로 제어할 환기량(maximum ventilation)을 사용자가 설정한다.

현재의 실내 온도가 목표 온도와 같거나 낮아지면 환기팬을 최소 환기량으로 제어하게 되며, 실내 온도가 목표 온도에 비하여 높아질수록 목표 환기량이 최대 환기량까지 증가한다. 최소 환기량과 최대 환기량은 사용자가 각각 1~99%의 범위에서 임의로 설정할 수 있다. 이렇게 하면 실내 온도를 목표 온도값으로 정확히 유지하도록 제어하는 상태에서도 최소 환기량으로 환기팬을 운

전함으로써 난방이나 냉방 에너지 손실을 최소로 하면서 실내의 먼지나 냄새를 적절히 밖으로 배출하게 된다.

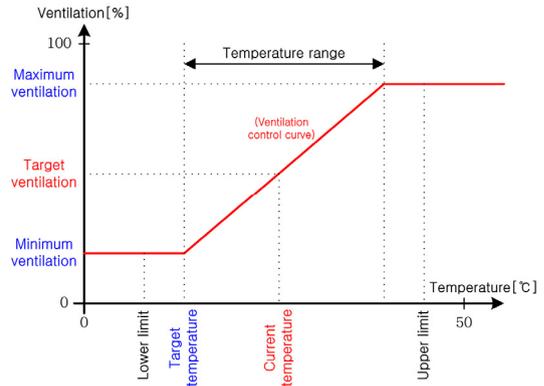


Fig. 4. Control characteristics curve of ventilation fan for windowless pig house

2.3 단상 유도전동기의 속도제어

본 논문에서 개발한 단독형 스마트 환기팬에서는 정격 전압이 단상 220V, 정격 용량이 448W, 정격 회전속도는 1678rpm인 커패시터 운전형 단상 유도전동기를 사용하여 환기팬의 구동 날개를 회전시킨다. Fig. 5에 일반적인 단상 유도전동기의 속도-토크 특성 곡선과 전형적인 부하 곡선을 함께 보였다.

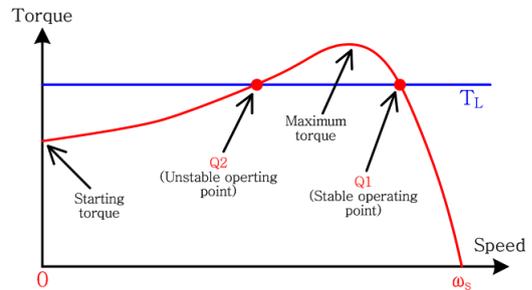


Fig. 5. Speed-torque curve of two-phase induction motor

이 그림에서 알 수 있듯이 단상 유도전동기는 최대 토크의 우측 영역에서 Q1처럼 발생토크 곡선과 부하토크 곡선이 만나서 평형을 이루게 되면 안정적(stable)으로 운전되지만, 곡선의 좌측 부분에서 Q2처럼 만나면 이는 불안정(unstable) 운전점이 되므로 전동기가 지속적으로 회전하지 못하고 정지하거나 또는 급속하게 안정 운전점으로 이동하게 된다. 그런데, 부하토크의 크기가 광범위하게 변하더라도 최대토크 우측의 안정 운전 영역에서는

전동기의 속도 변동폭이 매우 좁기 때문에 단상 유도전동기는 동기속도의 70% 이상 영역에서만 거의 정속 운전용으로 사용하는 것으로 알려져 있다.

이 때문에 Fig. 6에 보인 것처럼 TRIAC을 사용하여 전동기에 인가되는 전압의 크기를 V_1, V_2, V_3 처럼 바꾸더라도 최대 토크 우측의 안정 운전 영역만 사용한다면 환기팬에서 요구하는 넓은 범위에서의 속도제어를 구현할 수가 없다. 그러나, 로터리 엔코더를 사용하여 전동기의 회전속도를 실시간으로 측정하고 이를 피드백(negative feedback)하여 전동기의 회전속도를 제어한다면 인가 전압의 크기를 V_4, V_5 처럼 더욱 낮추어 속도-토크 곡선의 불안정 영역에서도 운전할 수 있기 때문에 전동기를 정지 상태에서부터 정격속도까지 넓은 범위에서 속도제어를 수행할 수 있게 된다. 이처럼 본 논문에서 개발한 스마트 환기팬에서 구동 날개의 속도센서는 전동기의 회전속도를 피드백하여 광범위한 영역에서 제어할 수 있도록 하고, 센서 날개의 유량센서는 실제 환기량을 측정하고 피드백하여 목표 환기량을 정확하게 달성할 수 있게 실제 환기량을 제어하도록 해준다.

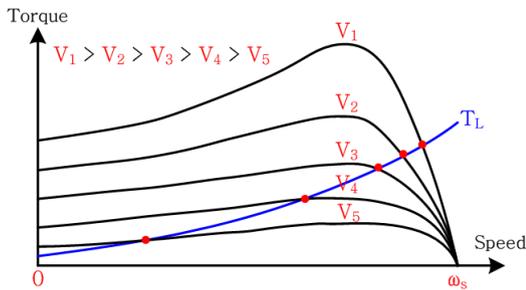


Fig. 6. Extension of fan speed control range using negative feedback

2.4 네트워크형 환기 제어 시스템

본 논문에서 개발한 단독형(stand-alone type) 스마트 환기팬은 목표 온도를 설정하면 현재 온도와 목표 온도를 고려한 최적의 환기량을 제어한다. 그러나, 목표 온도는 Table 1에 보였듯이 돼지의 사육 단계에 따라 달라지며, 하루에도 주간이나 야간에 따라 다르고 1년의 4계절에 따라 주간 및 야간 시간이 다르므로 날짜의 변화에 따라 목표 온도가 적절히 조금씩 다르게 설정되어야 한다. 야간에는 주간에 비하여 목표 온도를 약 2도 높게 설정하는데, 이를 갑자기 변동시키면 돼지가 온도 충격을 받으므로 3시간동안 서서히 변화시킨다. 이러한 스마트 환기 제어를 위하여 단독형 환기팬의 상위에 중앙 컨

트롤러(central controller)를 설치하고 이들 사이를 RS-485 통신으로 연결한다. 돈방이 크면 충분한 환기 제어를 위하여 2개의 환기팬을 설치하므로 1대의 중앙 컨트롤러에는 상황에 따라 1~2개의 단독형 환기팬을 연결할 수 있다. 이러한 중앙 컨트롤러는 RS-485 통신을 사용하여 퍼스널컴퓨터에 연결하며, 인터넷을 통하여 스마트폰으로 원격 모니터링 및 제어를 수행할 수 있다. 이와 같은 네트워크형(network type) 스마트 환기 제어 시스템을 Fig. 7에 보였다.

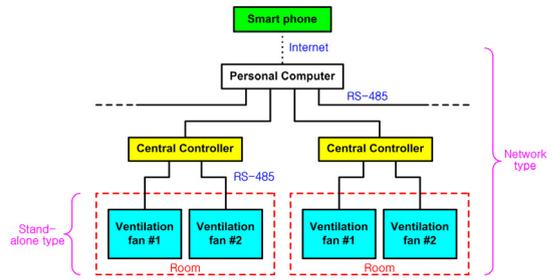


Fig. 7. Block diagram of advanced smart ventilation system for windowless pig house

3. 실험 결과

본 논문에서 제안한 스마트 환기 제어 시스템의 성능과 적용 효과를 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 먼저 TRIAC을 사용한 위상제어 방식으로 환기팬의 단상 유도전동기에 공급되는 전압을 가변하는 동작 파형을 측정할 결과는 Fig. 8과 같다. 여기서 V_{in} 과 V_{out} 은 각각 점화각(firing angle)이 120° 일 경우에 제어기의 입력전압과 출력전압의 파형이며, V_g 는 TRIAC의 게이트 입력전압 파형을 나타낸다.

또한, Fig. 9는 겨울철에 목표 온도 20°C , 현재 실내 온도 18°C 에서 외부 온도(external temperature)의 변동에 따른 모터 회전량(motor driving amount)을 측정 한 그래프이다. 여기서 최대 환기량은 99%로 설정하였고, 최소 환기량은 곡선 (a)에서 10%, 곡선 (b)에서 5%, 곡선 (c)에서 1%로 설정하였다. 현재의 실내 온도가 목표 온도보다 낮으므로 환기팬은 최소 환기량으로 제어되며, 외부 온도가 낮을수록 실내외의 음압이 커져서 최소 환기량으로 유지하기 위한 모터 회전량이 증가하는 것을 알 수 있다.

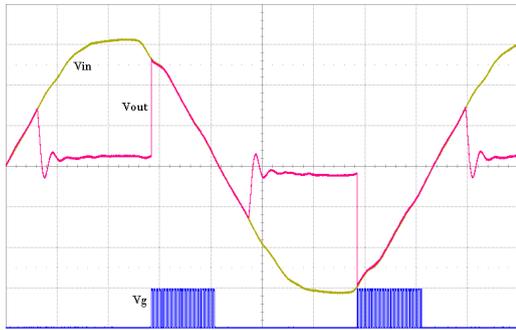


Fig. 8. Operational waveforms of ventilation fan controller

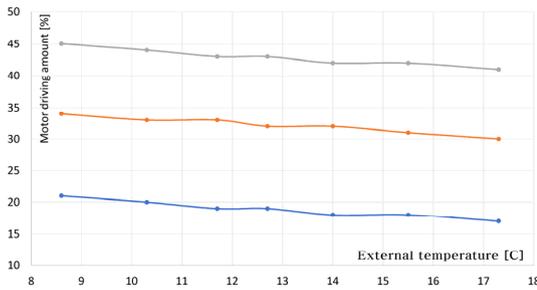


Fig. 9. Experimental results of measuring motor driving amount according to the external temperature

본 논문에서 개발된 환기팬을 1년 이상의 시간동안 서로 다른 3곳의 돼지농장에 실제로 적용한 결과 A농장에서는 MSY가 18두에서 25두로 높아졌고, B농장에서는 20두가 26두로 높아졌으며, C농장에서는 24두가 31두까지 크게 높아지는 결과를 보였다. 여기에는 여러 가지의 복합적인 요인이 있겠지만 적절한 환기를 통하여 건강 강한 돼지를 사육함으로써 폐사율을 낮추고 출하 시기를 앞당기게 된 것이 생산성 증가의 가장 큰 항목이 되었을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 TRIAC을 사용한 저가형의 무창돈사용 고성능 스마트 환기팬을 개발하였으며, 이를 모형 축사에 설치하여 시험한 결과 실내 온도에 비해 외부 온도가 낮아서 강력한 음압이 발생하더라도 팬의 회전속도가 변화하면서 항상 일정한 목표 환기량으로 잘 제어되는 것을 확인하였다. 개발된 환기팬을 1년간 3곳의 돼지농장에 실제로 적용한 결과 모든 농장에서 MSY가 크게 향상

되었으며, 축사 관리에 필요한 노동력을 상당히 절감하고 소득이 증가하여 시험 사육 농가들로부터 큰 호평을 받았다.

References

- [1] J. I. Song, J. H. Jeon, H. K. Park, H. S. Kang, D. Y. Choi, D. H. Kim, and K. H. Park, "The Effect of Ventilation System Renovation from Winch Style to Non-window Style for Swine Barn", *Journal of Animal Environmental Science*, Vol.16, No.2, pp.109- 114, Aug. 2010.
- [2] Y. Y. Kim, Y. D. Jang, and W. S. Joo, *Swine Managements and Nutrition*, SNUPRESS of Seoul National University, 2011, pp.325-329
- [3] S. H. Lee, "Pig productivity has been standing still for 10 years, let's upgrade the productivity", *Pig and Pork*, Vol.2020, No.5, pp.306-311, May 2020.
- [4] H. H. Chang, *Studies on the Automation of Environmental Control Systems for Windowless Pig-Housing*, Ph.D dissertation, Chungnam National University, Korea, pp.4-7, 1998.
- [5] J. H. Lee, *Pig Breeding and Energy Environment 4*, Guro PNP Publishing Co., 2011, pp.179-180
- [6] Y. R. Mock, "A Pig House Ventilation Fan Including Controller", Korea Patent 10-0856986, Aug. 29. 2008.
- [7] K. W. Na, "Air Way Changing Device and Ventilation Fan", Korea Patent 10-1318166, Oct. 8. 2013.

윤 덕 용(Duck-Yong Yoon)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 전기공학과 졸업 (공학사)
- 1983년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사)
- 1995년 2월 : 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사)
- 1985년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 전기전자제어공학부 교수

<관심분야>

유도전동기 및 동기전동기 서보제어 시스템 설계
마이크로프로세서 응용기술 교육