

발간등록번호

11-1541000-001704-01

폐열회수형 환기장치를 이용한 육계사
환기시스템 개발

오성이알에스테크(주)

농림수산식품부

제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “폐열회수형 환기장치를 이용한 육계사 환기시스템개발” 보고서로 제출합니다.

2012 년 12 월 27 일

주관연구기관명 : 오성이알에스테크(주)

주관연구책임자 : 한 건 수

세부연구책임자 : 이 인 복

위탁연구책임자 : 한 화 택

연 구 원 : 김 도 형

연 구 원 : 엄 성 훈

연 구 원 : 김 강

연 구 원 : 신 철 용

연 구 원 : 남 상 훈

연 구 원 : 한 창 호

연 구 원 : 김 태 완

연 구 원 : 서 일 환

연 구 원 : 제시비톡

연 구 원 : 권 경 석

연 구 원 : 하 태 환

연 구 원 : 이 성 복

연 구 원 : 조 예 슬

요 약 문

I 폐열회수형 환기장치를 이용한 육계사 환기시스템개발

II 연구개발의 목적 및 필요성

육계사 내부에서 발생하는 수분, 먼지, 유해가스를 제거하기 위해 환기는 필수적이다. 동절기 환기에는 차가운 외기가 유입되므로 과도한 난방에너지가 필요하고 육계사 시설 내 계군 온도의 열적 불균일성이 야기되어 안정적이고 적절한 열환경 조성에 어려움을 겪고 있다.

동절기 환기로 인해 과도한 열에너지 손실과 계군온도의 열적 불균일성이 발생할 경우 육계의 성장속도 감소, 열적 스트레스로 인한 호흡기성 질병 유발 및 그로 인한 폐사율 증대, 난방비용 증가 등 경제적인 손실로 이어진다 따라서 안정적인 육계 생산성 유지 및 농가 소득 증대를 위하여 환기로 인한 난방에너지를 절감하고, 환기 시스템 작동시 육계사 시설 내 계군 온도의 열적 불균일성의 발생을 최소화할 수 있는 육계사 환기시스템의 개발이 필수적이다.

III 연구개발의 내용 및 결과

본 연구에서는 육계사에서 배출되는 폐열의 효과적인 재이용을 위해 육계사용 폐열회수 환기장치를 개발하였고 이를 이용한 육계사 환기시스템을 개발하였다. 본 환기 시스템을 육계사 적용하였을 때 예측되는 계군 내 열환경 분포를 분석하고 적정 열환경 조성을 위한 환기시스템 운영 방안을 제시하였다.

육계사는 먼지가 많이 발생하고 내부 공기의 습도가 상당히 높게 유지되기 때문에 폐열회수 환기장치의 열교환기에 먼지와 결로, 결빙으로 인한 문제가 발생한다. 따라서 육계사에 사용되는 폐열회수 환기장치는 일반 건물용과 달리 먼지 및 표면의 열교환면에 결로된 물을 자연적으로 배출할 수 있는 구조로 만들어져야 하고, 결빙 상태를 정확히 파악하고 단시간 내에 해빙할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 열교환효율 75%, 환기 풍량 3,000CMH이고 해빙기능을 가진 육계사용 폐열회수 환기장치를 개발하였다.

본 연구에서는 개발한 폐열회수 환기장치와 기존의 배기팬을 복합한 육계사 환기시스템을 개발하여 충북 음성군 무창계사 농가에서 7회에 걸쳐 실험하였다. 년평균 난방에너지 절감율은 65%였고 제시된 환기시스템 운영 방안을 적용한 결과 계군 온도의 열적 불균일성으로 인한 호흡기 질병은 발생하지 않았다. 그리고 미국 Summerton의 무창계사에 폐열회수 환기장치를 설치하여 실험한 결과 난방에너지 절감율 약 50%를 달성하였다.

SUMMARY

It is essential to remove moisture, dust, and hazardous gases in the indoor air of broiler houses. Because of the inflow of outside cold air in the winter season, there are large consumption of the heating energy and nonuniformity of the temporal and spatial temperature distributions in broiler houses. Thus, it is difficult to maintain stable and appropriate thermal environment.

The conventional forced ventilation systems cause excessive heating energy loss and thermal nonuniformity. They lead to economic losses such as decreasing the rate of chicken growth, occurrence of respiratory disease due to thermal stress, increasing the death rate, rising cost of heating energy, etc. For keeping stable chicken productivity and boosting chicken farmers' income, it is essential to develop a ventilation system for broiler houses, that can save the heating energy consumption and minimize the occurrence of thermal nonuniformity in broiler houses.

In this research, a ventilation system for broiler houses using HRV (heat recovery ventilator) was developed, that is able to recover the energy from exhaust air effectively. Also, the thermal distributions, which are expected when the system is applied, are analyzed and the operation plan of the system was presented for maintaining the appropriate thermal environment in broiler houses.

Because the internal environment of broiler house is very dusty and humid, there are great possibilities of problems, caused by dust covering, water condensing, and ice freezing, in the heat exchanger of HRV. So, different from the HRVs for residential buildings, the HRV for broiler houses must have structure that can excrete and eliminate the covered dust and the condensed water naturally and easily. And, when the condensed water freezes, the system takes in this freezing situation and de-ices the ice in short time automatically. The heat transfer efficiency and the ventilation air-flow rate of HRV for broiler houses, developed in this research, were 75% and 3,000CMH respectively. And, it was also designed to perform the automatic de-icing function.

In this research, the ventilation system for broiler houses was completed by combining the newly developed HRV with the existing exhaust fans. This

system was installed and tested 7 times in the typical broiler house constructed with concrete blocks and located at Eumsung in Chung-Buk Province. The test results showed that the heating energy cost was saved by an annual average of 65%, and there was no occurrence of the respiratory disease due to the thermal nonuniformity. The same HRV was also installed and tested in the american style broiler house located at Summerton in South Carolina State, U.S.A. As expected, the heating energy savings were running at 50%.

CONTENTS

- I - Summary of research	6
- II - State of affairs of international and domestic technical development	
i Analysis of ventilation of agricultural facilities usingComputational FluidDynamics (CFD) technology	11
ii Heat recovery ventilation system	12
iii Ventilation systems with duct	16
- III - Material, Methods, Results and Discussions	
i Development of CFD simulation model for predicting internal environmental conditions of broiler	18
ii Assessment of thermal condition of forced ventilation system and HRV system of broiler house using CFD technology	32
iii Design of ventilation operation and management of forced ventilation system and HRV system of broiler house using CFD technology	93
iv Analysis of jet drop distance from multi slot-type openings ..	194
v Heat recovery ventilator	230
vi Ventilation system of broiler house using heat recovery ventilator	296
vii Field test of ventilation system	302
viii Result	324
- IV - Achievement of research and Contribution of related field	325
- V - Final product and its future plan of research	327
- VI - International Scientific and technical information	333
- VII - Research facility and Instrument	333
- VIII - Reference	334

목 차

제 1 장	연구개발과제의 개요	
	제 1 절 연구개발의 필요성 및 목적	6
	제 2 절 연구개발의 최종 목표	10
제 2 장	국내외 기술개발 현황	
	제 1 절 전산유체역학 기법을 이용한 농업 시설 환기 해석	11
	제 2 절 폐열회수 환기장치	12
	제 3 절 덕트 시스템을 이용한 환기 시스템	16
제 3 장	연구개발 수행 내용 및 결과	
	제 1 절 육계사 내부 환경 변화 모의를 위한 시뮬레이션 모델 제작	18
	제 2 절 전산유체역학 기법을 이용한 국내 일반 강제 환기 육계사 환기 시스템 및 HRV 환기 시스템 적용 계사의 열효율 평가	32
	제 3 절 국내 일반 강제환기식 육계사 및 HRV 복합 환기 시스템 적용 계사의 운영 주기 도출	93
	제 4 절 Jet drop distance 이론을 이용한 입기 슬롯으로부터 유입되는 기류의 궤적 특성 분석	194
	제 5 절 폐열회수 환기장치	230
	제 6 절 폐열회수 환기장치를 이용한 육계사 환기시스템	296
	제 7 절 육계사 환기시스템의 현장 실험	302
	제 8 절 연구결과	324
제 4 장	목표달성도 및 관련분야에의 기여도	325
제 5 장	연구개발 성과 및 성과활용 계획	327
제 6 장	연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	333
제 7 장	연구시설·장비 현황	333
제 8 장	참고문헌	334

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 필요성 및 목적

생활수준의 향상 및 식도락의 변화에 따라 국내 육류 소비량이 꾸준히 증가하고 있는 가운데 양계 산업 또한 국내 농·축산업 분야 중 약 26% 정도의 높은 비중을 차지하고 있다(통계청, 2011년). ‘규모의 경제’ 논리에 따라 시설 규모는 점차 대형화 되어가고 있으며 시설 단위 면적당 16~20마리 정도의 고밀도의 ‘집약형’ 밀집 사육을 실시하여 축산물의 생산력 증대 및 가격 경쟁력 제고를 도모하고 있다. 실제로 2000년 이후 50,000수 이상의 대규모로 닭을 사육하고 있는 농가 수가 꾸준히 급증하고 있으며 2010년 기준, 생산 주기 당 약 1.4억 수의 양계를 생산하는 것으로 보고된 바 있다(통계청, 2011).

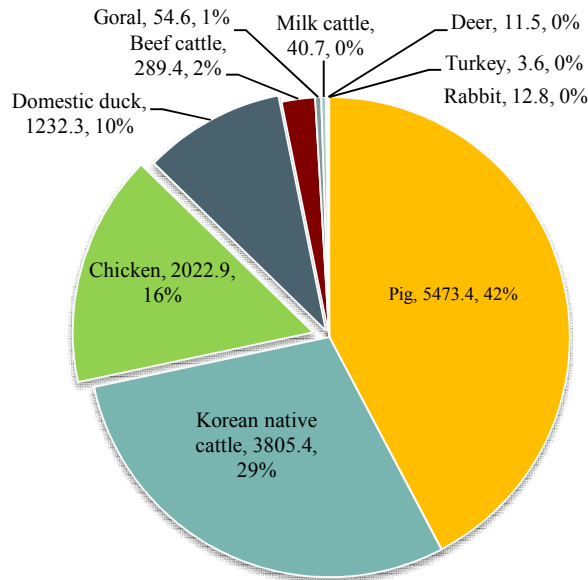


Fig. 3.1.1 국내 축산업 품종 별 비율(통계청, 2011)

고밀도 집중형 사육으로 인하여 시설 내부에 집적되는 사료, 동물의 피부 박편, 털, 분변 등으로 인한 각종 미세 먼지나 미생물, 유해 가스 등이 시설 내부에 과도하게 집적되는 상황이 야기될 수 있다. 이러한 경우, 일반적으로 환기를 통하여 신선한 외부 공기를 주입하고 시설 내부에 발생 및 집적되어 있는 각종 오염 물질 및 유해 가스를 제거함으로써 내부 환경의 개선을 도모하고 있다. 이에 따라 동물군의 최적 환경 조성의 중요성이 대두되면서 적합한 시설 환경 마련이 더욱 요구되고 있으나

적정 환기 및 내부 환경 요소의 유지가 쉽지 않아 육계의 생산성 향상에 많은 어려움이 산재하고 있다. 또한 사계절이 뚜렷한 국내 기후 특성 상, 동절기의 경우 상대적으로 차가운 외기의 유입으로 인하여 시설 내 계군 온도의 열적 불균일성이 야기될 뿐 만 아니라 안정적인 적절한 열환경 조성에 어려움을 겪고 있다. 일반적으로 계군 내 적정 생육 온도 범위 이상의 과도한 열에너지가 축적되거나 혹은 그 반대로 과도한 열에너지의 손실이 발생할 경우, 육계의 일일 평균 사료 섭취량 및 음수량의 저하를 야기시키며 그에 따른 성장 속도 감소 및 출하 시 증체량의 감소, 열 스트레스로 인한 호흡기성 질병 유발 및 그로 인한 폐사율 증대 등 경제적인 손실 문제로 이어진다. 따라서 안정적인 양계의 생산성 유지 및 농가의 소득 증대를 위해서는 환기 시스템의 동작 및 각종 환경 변수에 의한 내부 환경 변화 모의, 그리고 계군 내 적정 열환경에 대한 분석이 필수적이다.

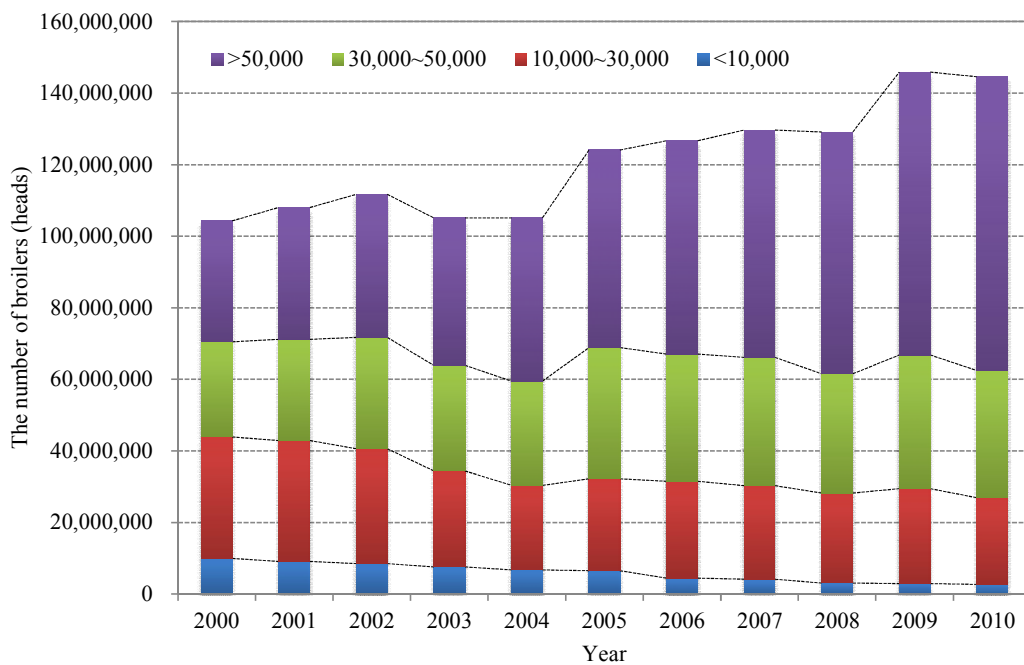


Fig. 1.1.4 국내 양계 산업 생산 규모 및 총생산량 변화 추이 (통계청, 2011)

한편, 2010년 기준, 농업용 에너지 소비량 중 시설 난방에 투입되는 에너지는 그 중 약 64% 정도로 상당 부분을 차지하고 있는 가운데, 5만수 무창 육계사에 대하여 일반적인 온풍기에 의한 난방 방법을 적용할 경우 연간 40,000~50,000 L의 경유를 사용하며 면세유 가격 적용 시 1년에 소요되는 난방비는 5천만원이 넘는다고 보고된 바 있다. 따라서 최근에는 시설 경영에 투입되는 에너지원의 절약 혹은 대체를

통하여 경제적 효과를 발생시키고자 하는 노력이 계속되고 있다. 실제로 지열원을 계사 난방에 활용하고 하는 ‘농어업에너지이용효율화사업’ 등이 시행되어 현장 보급 중에 있으나 이러한 수직 개방형 지열원의 경우 지열원 확보를 위한 천공, 파이핑, 히트 펌프 설치, 시설 개량 등의 초기 투자비가 2억원 이상이 소요되며 지열원 설치 가능 지역이 일부에만 국한되는 등 농가에 부담요소로 작용되고 있다.

이에, 동절기에 시설 난방을 위하여 투입되는 에너지의 상당 부분이 환기 작용으로 인하여 손실되고 있는 현실을 고려할 때 효과적인 에너지의 투입, 관리 및 적용에 관한 연구가 필수적이며 이에 대한 일환으로써 본 연구에서는 육계사에서 배출되는 폐열의 효과적인 이용을 위한 폐열회수 환기장치(Heat Recovery ventilation system, HRV)를 제시하고 있다. 시설로부터 배출되는 고온의 배기류를 이용하여 시설 내부 환기를 위하여 투입되는 차가운 외기를 가온시키는 폐열회수 환기장치를 통하여 시설 난방을 위하여 투입되는 에너지의 절약을 도모하고 차가운 외기의 유입으로 인한 열적 균일성 감소 및 그에 기인한 호흡기성 질병 발생을 미연에 방지하고자 하는 효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 최근 농업 시설의 환기 해석 및 내부 환경 평가에 활발히 적용되고 있는 전산유체역학 기법을 이용하여 수치해석적인 접근을 통하여 실험 육계사 내부 환경을 모의할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발하고 이를 이용하여 국내 일반 육계사의 환기 구조 및 폐열회수 환기 장치를 적용한 구조에 대하여 환기 시스템 가동 시 시간에 따른 내부 열환경 변화를 모의하고 이에 대한 분석을 실시하며 특히 계군 내 열적 균일성, 적정성, 안정성 등의 개선 효과를 판단하고자 한다. 또한 동절기 계군 내 호흡기성 질병 등의 발생을 미연에 방지하기 위하여 일반 음압식 육계사 환기 시스템 및 폐열회수 환기 시스템을 적용한 계사에 대한 외부 환경 조건 별 환기 운전 주기를 산출하고자 한다. 그리고 국내 대표적인 일반 강제 환기 시스템을 적용하고 있는 계사 시설에 대하여 적정 열환경 조성을 위하여 ‘Jet drop distance’ 개념을 이용하여 동절기 입기 슬롯을 통하여 유입되는 기류의 궤적 특성을 파악하고자 한다.

육계사용 폐열회수 환기장치는 일반 건물용에 비해서 다른 특성을 요구받는다. 상대적으로 공간적 크기의 제약은 덜한 반면 혹독한 환경 조건에서 운전될 수 있어야 하고 또 유지관리가 용이하여야 한다(1,2,3). 특히 닭의 활동뿐 아니라 짚과 사료 등으로부터 다량의 분진이 발생하고 계사 내부 공기의 습도가 상당히 높게 유지되기 때문에 폐열회수 환기장치의 열교환기에 분진과 결로 문제가 발생할 수 있다

(4,5). 또 겨울철 육계사 내부는 상대습도가 60%에서 70%로 습도가 높게 유지되기 때문에 열교환기에서 결로 발생은 불가피하다. 열교환면의 온도가 열교환기에 흐르는 공기의 이슬점 온도 이하가 되면 결로가 맺히게 되고, 열교환면의 온도가 0℃ 이하로 내려가면 결로에서 결빙이 발생하기 시작한다(2,3). 결빙이 성장할수록 열교환기의 유로가 막혀 압력손실이 증가하고, 유량이 감소하여 열교환효율이 감소되며, 심각한 경우 결빙에 의해 유로가 모두 막혀 폐열회수 환기장치를 사용할 수 없게 된다(6,7,8). 따라서 육계사에 사용되는 폐열회수 환기장치는 일반 건물용과 달리 분진 및 표면의 열교환면에 결로된 물을 자연적으로 배출할 수 있는 구조로 만들어져야 하고(9,10,11), 결빙 발생 시 결빙 정도를 정확히 파악하고, 해빙할 수 있는 구조로 개발되어야 한다.

폐열회수 환기장치를 육계사에 도입하는 1차 목표는 환기로 인해 발생하는 난방 에너지를 절감하는 것이지만 동절기에 육계사에 필요한 환기를 모두 폐열회수 환기장치로 할 필요는 없다. 육계는 일반적으로 고밀도 집중형 사육을 한다. 닭들이 성장함에 따라 체열이 많이 발생하므로 성장과 더불어 난방에너지 소비량은 감소하고 외기 온도가 높은 환절기 주간과 하절기에는 오히려 닭의 체열을 제거하기 위한 외기 냉방이 필요하다. 그리고 폐열회수 환기장치는 기존의 육계사에서 사용하고 있는 배기팬보다 고가의 환기장치이므로 폐열회수 환기장치와 기존의 배기팬 환기 시스템을 복합한 육계사 환기시스템이 훨씬 합리적이다.

기존의 육계사 환기장치는 대부분 배기팬을 사용한 음압식 육계사 환기 시스템을 사용하고 있으며 여기에 적절한 환기시스템의 운영방법은 제시되어 있지만 폐열회수 환기장치와 복합한 육계사 환기시스템의 운영방법은 제시되어 있지 않다. 따라서 폐열회수 환기장치를 육계사 환기에 도입하는데 있어 최적의 열적 균일성, 적정성, 안정성 등의 효과를 발휘할수 있는 환기 시스템의 설계가 필수적이며 환경 설계 조건에 따라 최적의 환기 운영 방안 제시가 필요하다.

본 연구의 목적은 폐열회수 환기장치를 이용한 육계사 복합환기시스템을 구축하여 환기로 인한 육계사의 난방에너지를 절약하고 환기 시 차가운 외기의 유입으로 인한 육계사의 열적 균일성 감소 및 그에 기인한 호흡기성 질병 발생을 미연에 방지하고자 하는 것이다.

제 2 절 연구개발의 최종 목표

육계사에서 환기로 인한 난방에너지를 절약하고 환기 시 차가운 외기의 유입으로 인한 육계사의 열적 균일성 감소 및 그에 기인한 호흡기성 질병 발생을 미연에 방지하고자 하는 본 연구의 목적을 위한 연구개발의 최종 목표는 다음과 같다.

- 육계사용 폐열회수 환기장치 개발
 - 해빙기능을 가진 폐열회수 환기장치
 - 육계사용 현열교환기
 - 폐열회수 환기장치 및 현열교환기 설계기술 확보
- 폐열회수 환기장치를 이용한 육계사 환기 시스템 개발
 - 내부순환 기능을 보유한 겸용 급배기 팬
 - 환기 시스템 운영기술 확보 및 시스템 Controller 개발
 - 육계사 환기 시스템에 따른 내부 환경 변화 모의를 위한 시뮬레이션 모델 제작
 - ✓ 시뮬레이션 모델의 검증을 위한 현장 실험
 - ✓ 시뮬레이션 모델의 정확도 검증
 - 전산유체역학 기법을 이용한 국내 일반 강제 환기 육계사 환기 시스템 및 HRV 환기 시스템 적용 계사의 열 효율 평가
 - HRV 환기 시스템 적용 계사 내 덕트 재배치에 따른 열환경 평가
 - 국내 일반 강제 환기 육계사의 계군 내 적정 열환경 조성을 위한 환경 조건에 따른 환기 운영 주기 도출
 - ✓ 11일령 환경 조건 시 배기팬 on/off 주기 산출
 - ✓ 25일령 환경 조건 시 배기팬 on/off 주기 산출
 - ✓ 환기 시스템 on/off 운전에 따른 가스 제거율 평가
 - HRV 복합 환기 시스템 적용 계사의 환경 조건에 따른 환기 운영 주기 도출
 - ✓ 11일령 환경 조건 시 HRV 환기 시스템 연속 운전에 따른 열환경 평가
 - ✓ 25일령 환경 조건 시 HRV 복합 환기 시스템의 운전 주기 산출
 - ✓ 복합 환기 시스템 연속 및 on/off 운전에 따른 가스 제거율 평가
 - Jet drop distance 이론을 이용한 입기 슬롯으로부터 유입되는 기류의 궤적 특성 파악

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 전산유체역학 기법을 이용한 농업 시설 환기 해석

육계 생산성 제고를 위하여 폐쇄된 공간에 고밀도 집중 사육을 실시함으로써 시설내부 생육 환경의 적정 환경 수준을 유지하는 것은 매우 어렵다. 이에 환기 시스템의 구조적 혹은 운영 방식의 개선 등을 통하여 내부 환경의 개선을 도모하고 있으며 이를 위하여 실제 육계가 생산되고 있는 시설을 대상으로 온도, 습도, 가스 농도 등 다양한 데이터를 실측하고 구조를 개선하는 등의 노력이 필요하다. 그러나 계사 내부의 열환경 평가를 위한 현장 실험의 경우 계사 전체를 평가하기에는 실험 장비의 한계(측점 개수의 문제, 실시간 모니터링에 따른 데이터 저장 공간 확보의 문제, 설치의 문제 등), 시간, 노력, 금전 등의 문제가 발생하며 생명체를 대상으로 실험이 진행되기 때문에 연구자가 원하는 환경 조건을 임의대로 조절·적용하기가 어렵고 일부 점 측정에 의존하여 전체 환경을 일반화하여 평가하는 데는 많은 한계점이 존재한다. 따라서 최근 계사, 돈사, 식품 저장고 등과 같은 농업시설 등의 내부 환경 평가 및 환기 해석에 활용되고 있는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 기술을 이용하여 해석하고자 하는 계사 내부의 환경 변화를 모의하고 HRV 환기 시스템 적용에 따른 열환경 모의 및 개선 효과, 적정 환기 시스템 운영 주기 산출, Jet drop distance model 적용을 통한 입기류 해석 등을 수행하고자 한다.

Blanes-Vidal (2008)은 환기시스템이 설치된 육계사에서서의 공기 흐름을 예측하기 위하여 CFD 시뮬레이션 기법을 활용하였으며 실측한 현장치 등을 이용하여 시뮬레이션 모델의 정확도를 개선시키고자 하였다. Hong et al. (2008)은 TGD 방법을 이용하여 계사 전체 및 지역적인 환기량을 산정하는데 CFD 시뮬레이션 기법을 활용하였으며 Cimbala et al. (2006)은 계사 내 질병 전파를 시뮬레이션을 통하여 모의하고자 하였으며 조류독감이나 기타 전염병 등의 발생 시 시설 내 공기질 관리의 중요성을 시사한 바 있다.

Tinoco (2010)는 3D-CFD 모델링을 이용하여 브라질의 일반적인 비단열 터널환기 시스템이 설치된 육계사에 관한 연구를 수행하였다. 이 연구는 열대 기후 지역에서의 육계사에 초점을 맞춘 연구로서 현장실험과 CFD 시뮬레이션을 이용하였으며, 시설 내 공기의 유속 및 온도분포는 좋은 통계적 상관관계를 보여주었다. 이를 통해 CFD는 육계사에서 실시간으로 열환경 예측이 가능하다는 것을 보였다.

제 2 절 폐열회수 환기장치

동절기 육계 시설 내부 환경 조절은 효과적인 난방 및 환기의 달성을 전제로 이루어진다. 계사 시설 내부 열에너지 손실의 주요 요인으로 외부로부터 유입되는 차가운 외기 및 환기 시스템의 가동 등을 꼽을 수 있다(Beckmas and Goedseels).

폐열 회수 환기 장치는 계사에서 외부로 배기되는 상대적으로 따뜻한 배기열을 다시 회수하여 시설 내부 난방에 재이용하는 장치이다. 시설의 환기를 위하여 외부의 차가운 외기가 유입됨과 동시에 폐열회수 환기 장치를 통하여 회수된 따뜻한 배기열의 열에너지를 이용하여 유입되는 공기를 가온시킨 후 다시 시설 내부로 투입함으로써 시설 난방에 소요되는 에너지 비용을 절감시키는데 그 목적이 있다. Walker et al. (1986)은 적절한 폐열회수 환기 장치는 부가적인 공기 정화 장치의 설치 없이 간단한 청소 작업을 통하여 유지 관리가 될 수 있어야 한다고 보고하였다. 뿐만 아니라 일반적인 폐열회수 환기장치의 효율로써 0.50~0.70 범위의 값이 추천되나 0.25 정도의 효율을 보여도 추가적인 열에너지의 손실을 방지할 수 있다면 충분히 운용이 가능하다고 언급하였다.

Harms and Johanson (1985)는 외기 온도가 이슬점 이하로 떨어질 경우 시설에서 외부로 손실되는 열은 시설 내부의 동물군에서 발생하는 열보다 크다고 보고하였다. 따라서 시설 내부의 적정 온도 유지를 위하여 추가적인 열 공급이 필요하다고 볼 수 있다. 외부로 손실되는 열에너지 중 일부는 배기팬 등을 통하여 배기되는 배출 기류에 기인하며 이에 대한 추가 설비의 설치가 이루어지지 않을 경우 배기되는 열에너지의 손실을 조절하기가 어렵다. 이에 폐열회수 환기장치 등의 설치 및 운용을 통하여 외부로 손실되는 배기 폐열을 재이용 혹은 재순환이 가능하며 이 경우 열에너지 손실량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 추가적인 열 공급 요구정도 또한 낮출 수 있다. 따라서 폐열회수 환기 장치는 난방을 위한 추가 설비의 설치 및 운용 비용의 감소 혹은 상쇄 효과, 난방비 등에 의한 운영비 절감 등을 기대할 수 있다. Selders et al. (1989)는 폐열회수 환기 장치의 축산 시설 적용 시 예상될 수 있는 주요 문제점으로 열교환기 표면에 집적되는 먼지로 인한 기계 장비의 효율 감소를 지적하였다. Berckmans and Goedseels (1985) 및 Walket et al. (1986)은 시설 내부 및 외부의 적은 온도 차, 기후 조건 등으로 인한 결빙 및 수분의 응결, 필터의 재질, 열 교환기 자체의 부식 및 기계에 집적되는 먼지와 수분으로 인한 공기 유동의 방해 및 열 교환을 감소 등을 지적하였다. 폐열회수 환기 장치의 부식 문제는 플라스틱 재질 혹은 개량 합금 등의 적용을 통하여 해결할 수 있다. Harms and Johanson (1985)는 먼지의 집적으로 인한 기계 성능 저하를 방지하기 위하여 주기

적으로 폐열 회수 환기 장치를 청소할 필요가 있다고 언급하였다.

폐열회수 환기 장치의 효율은 일반적으로 제조사의 의해 제공되는 데이터에 의존하는 경우가 대부분이다. 일반적인 기계 설비의 효율은 기계로 유입되는 공기의 온도에 따라 다음식과 같이 정의된다.

$$e = \frac{t_e - t_o}{t_i - t_o} \quad \text{식 (2.2.1)}$$

여기서, e=effectiveness, t_e =Incoming air temperature after passing through the heat exchanger, °C, t_o =Outside air temperature, °C, t_i =Inside room air temperature, °C

Kennedy et al. (1991)은 폐열회수 환기장치 자체의 열 특성이 ‘효율’의 의미로 정의될 수 있다고 보고하였다. 효율(e)은 회수된 열량 대비 전체 회수 가능한 열량의 비율로 정의되며 이는 각각 다음의 식을 통하여 계산된다.

$$e = \frac{C_c(T_\infty - T_{ci})}{T_{wi} - T_{ci}} \quad (\text{when } c_w = c_{\min}) \quad \text{식 (2.2.2)}$$

$$e = \frac{C_c(T_\infty - T_{ci})}{T_{wi} - T_{ci}} \quad (\text{when } c_w = c_{\min}) \quad \text{식 (2.2.3)}$$

여기서, C=Fluid capacity rate, W/°C, T=Temperature, °C

w=Warm fluid, c=Cold fluid, i=Inlet, o=outlet

Harms and Johnson (1985)은 폐열회수 환기장치의 방식을 다음과 같이 향류(counter-flow), 직교류(cross-flow), 병류(parallel-flow) 등으로 분류하였다.

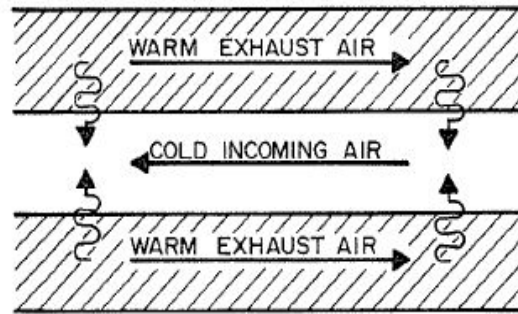


Fig. 2.2.1. Heat transfer across the exchange plates in a heat exchanger

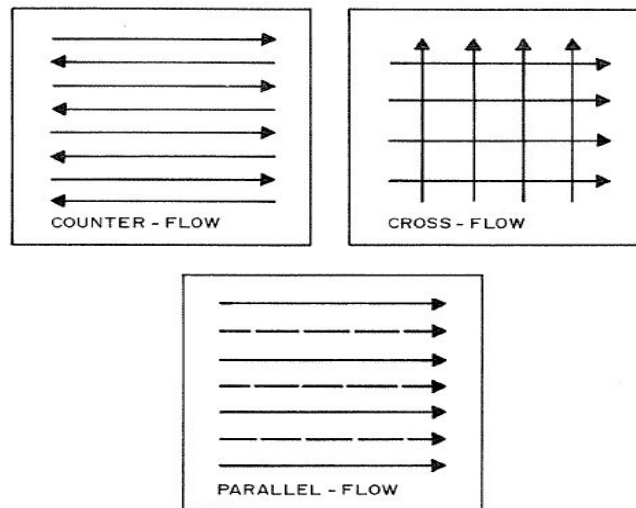


Fig. 2.2.2. Types of air-to-air heat exchangers

이론적으로 가장 높은 효율의 폐열 회수 환기장치는 향류 방식이며 직교류, 병류 순으로 효율이 높은 것으로 보고하고 있다.

Kennedy et al. (1991)은 다음 그림과 같이 565 L/s의 공기 교환율을 갖는 폴리염화 비닐(Polyvinyl chlorid, PVC) 열 교환기를 약 7,000마리 규모의 육계사의 설치하였다. 평판 열 교환기는 유지비를 최소화하기 위한 계사에서 운영될 수 있고 1.6mm 정도의 PVC 판 열교환기의 열저항은 무시될 수 있으며 병류식의 평균 열교환효율은 0.38정도로 보고하였다. 연구 대상 지역의 조건에서 당시 천연가스 가격 기준 3.0년의 투자회수기간을 기대할 수 있다 보고한 바 있다.

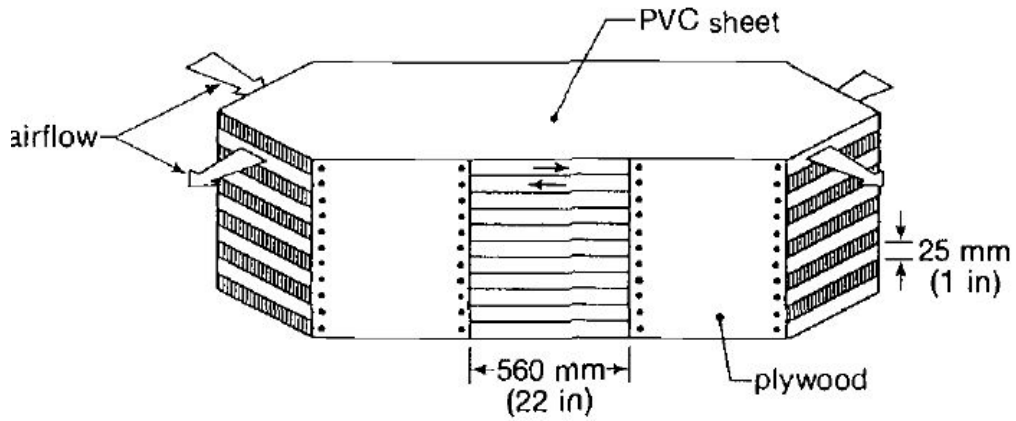


Fig. 2.2.3. Structure of heat exchanger core (Kennedy et al., 1991)

Beckmans and Goedseels (1985)는 그들의 연구를 통하여 평판 향류 방식의 열교환기가 장기간 이용 시 경제적이라고 언급하였다. 상용 향류식 열교환기의 평균 잠열 회수 효율은 약 62%정도이며 shell and tube 형 열 교환기의 효율은 약 30% 정도로 보고되었다. Scott (1984)는 동절기의 밀폐된 건물에서의 환기로 인한 열 손실량을 줄이기 위하여 암반식 열교환기 등에 대한 연구를 수행하였다. Selders et al. (1989)은 다음 그림과 같이 12,000수 규모의 육계의 열 회수율 향상, 사료 섭취량 유지, 출하 품질 향상 및 연료 소비량 감소를 위하여 판형 향류식 열 교환기를 설치하여 운용하였으며 그 결과 프로토 타입의 열 교환기가 기존 열 교환기 대비 약 14.5% 향상된 열 회수율을 보였으며 전반적으로 기존 계사에서 출하된 양계 품질보다 높은 출하 품질을 보이는 것으로 보고되었다.

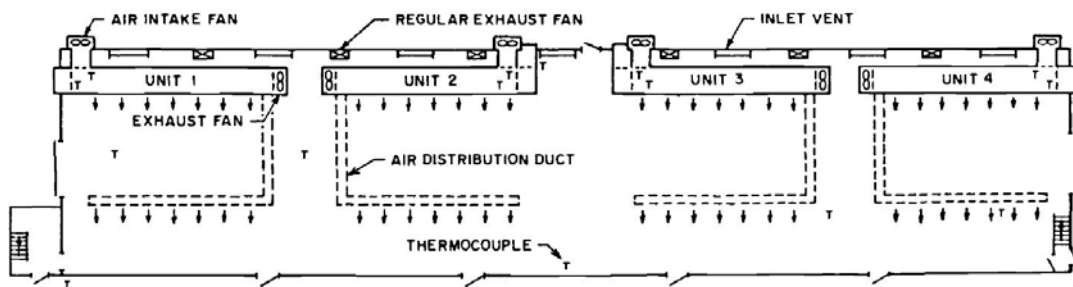


Fig. 2.2.4. Heat exchanger arrangement in prototype broiler house (Selders et al., 1989)

제 3 절 덕트 시스템을 이용한 환기 시스템

공공시설, 산업 및 농업 시설 등의 냉난방공조에는 주로 천공 덕트가 사용되고 있다(Moueddeb et al., 1997). 천공 덕트는 시설 전체 공간에 신선한 공기를 효율적이고 균일하고 공급할 수 있으므로 냉난방공조 설계 시 선호되고 있으나 그 설계 방식에 따라 환기 성능이 좌우된다. Carpenter (1972)는 축사 설계 시 공기 주입식 저압 덕트(inflatable low-pressure duct)를 사용한 바 있다. 공기 주입식 덕트는 덕트 구조로부터 지속적으로 공기가 균일하게 주입됨으로써 시설 전체에 균일한 신선 외기를 공급하도록 설계되어 있다. Harms and Johnson (1985)는 겨울철 최소 환기가 요구되는 경우 폴리에틸렌 덕트를 사용할 것을 제시한 바 있다. 해당 덕트의 경우 유입부에 설치된 팬이 덕트의 각 천공으로 공기를 밀어 넣음으로써 더운 공기가 시설로 골고루 공급되도록 하는 구조이다. 이 때 히터를 유입부 팬 주변에 설치함으로써 가온된 공기가 시설로 공급되도록 할 수 있다. 천공 덕트에 의한 유입되는 공기의 분배는 덕트의 재질, 팬 용량 및 성능, 천공 형태, 천공의 크기 및 간격, 덕트의 길이, 덕트 단면적 등 다양한 요인에 의한 복잡한 함수 형태로 나타난다(Moueddeb et al., 1997). Moueddeb et al.(1997)에 따르면 천공 덕트에 의한 유입 공기의 분배 형태는 일반적으로 에너지 보존법칙을 설명하는 열역학 제 1법칙에 따른 베르누이 방정식(Bernoulli's equation)으로 표현될 수 있다.

$$V_o = \sqrt{2\left(\frac{V_x^2}{2} + \frac{P_x}{\rho}\right)} \quad \text{식 (2.3.1)}$$

여기서, V_o = 덕트 입기구에서의 공기 배출속도, m/s, V_x = 덕트 천공에서의 평균 공기 유속, m/s, P_x = 덕트 천공에서의 정압, Pa, ρ = 공기 밀도, kg/m³
또한 다음의 식을 이용하여 배출구에서의 배출 계수를 산정하였다.

$$q_a = C_d A_{om} V_o = C_d A_o V_o \sin(\alpha) \quad \text{식 (2.3.2)}$$

여기서, V_o = 배출유속, m/s, α =배출각도, degree, q_a = 측정 배출 유량, m³/s, C_d = 배출구에서의 배출계수, 무차원, A_{om} =배출기류에 수직으로 투영되는 배출면적, m²

배출 각도는 덕트의 배출구에서 실측을 통하여 직접 측정하며 덕트에서의 평균

유속과 배출 기류의 잠재 유속으로부터 계산할 수도 있다. 덕트의 길이 방향으로의 마찰 손실은 운동 에너지와 운동량의 보존 법칙으로 확인할 수 있는데, 이러한 마찰 손실은 사실상 배출 각도에 큰 영향을 미치지 못한다. Barrington and MacKinnon (1990b)는 천공 덕트에서의 공기 유동에 역학적 특성을 고려하여 평균 유속과 잠재 유속에 대한 다음과 같은 식을 각각 제안하였다.

$$V = H_0 \frac{X}{L} + (V_L - H_0) \frac{X^2}{L^2} \quad \text{식 (2.3.3)}$$

$$E = \frac{F}{D_H} \int_0^x \frac{V^2}{2} dx + \frac{V^2}{4} + V\sqrt{E} + E_0 \quad \text{식 (2.3.4)}$$

여기서, V : 평균 공기 유속, m/s, E : 잠재 공기 유속, m/s, H_0 : $x=0$ 위치에서의 등가 배출 에너지, $\text{m/s} = \theta C_0 E_0^{0.5}$, θ : 구경비 (aperture ratio) = Lh/A , X : 덕트 시작점에서의 거리, m, L : 덕트의 길이, m, V_L : 덕트의 평균 단면 유속, m/s, F : Darcy-Weisbach 마찰 계수, D_H : 덕트의 수리학적 직경 (hydraulic diameter), $\text{m} = 4A/R$, A : 덕트의 단면적, m^2 , R : 덕트의 동수반경, m, E_0 : 덕트 시작점에서의 잠재 유속, $\text{m}^2/\text{s}^2 = P_0/P$, P_0 : 덕트 뒷부분에서의 정압, Pa, P : 덕트 내에서의 정압, Pa, h : 긴 슬롯형 배출구의 폭, m

Pick et al. (1990)은 기류의 균일성에 덕트의 크기 및 직경이 중요한 영향을 미친다는 사실을 증명한 바 있다. Carpenter (1972)는 380mm에서 256, 203, 127mm로 1.5 비율로 줄어드는 구멍을 가진 3m 길이의 덕트를 설계한 후 실험 결과 구멍 크기를 길이방향으로 줄임으로써 길이방향 유량의 균일성을 향상시킬 수 있었다고 보고하였다. Pick 등 연구 결과, 압압식 환기 시 85%의 기류 균일성을 확보할 수 있었던 0.305 m 직경의 최대 주름관 덕트의 길이는 팬의 유속이 7.62 m/s일 때 약 27m이었다. 음압식 환기에서는 동일한 조건에서 약 11m가 적절한 길이라는 결과를 얻었다.

Harms and Johnson (1985)는 천공의 수가 너무 적으면 덕트 내 걸리는 압력에 의하여 팬이 최대 용량으로 작동하는데 문제가 발생하며, 천공의 수가 많으면 각 구멍에서 공기가 배출되는데 문제가 생길 수 있다고 지적하였다. 덕트의 길이에 관계없이 덕트에서 천공의 전체 면적은 매우 중요하다. El Moueddeb et al. (1997b), Harms and Johnson (1985)는 구경비를 구멍의 전체 면적을 덕트의 단면적 넓이로 나눈 값으로 정의하였으며, 1.5의 구경비를 추천한 바 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 육계사 내부 환경 변화 모의를 위한 시뮬레이션 모델 제작

1. 시뮬레이션 모델의 검증 자료 확보를 위한 현장 실험

가. 현장 실험 계사

충청남도 논산시 부적면 신교리에 위치한 육계사 시설을 대상으로 현장 실험을 진행하였다. 해당 계사의 경우 총 길이 42m, 측벽 높이 2m, 최고점 높이 3.8m, 폭 9m 규모로 약 7,500수를 생산한다. 총 4동이 2행 2열로 배치되어 있으며 각 동의 환기 시스템 및 각종 설비는 동일하게 구비되어 있다. 환기 시스템은 자연환기식과 강제환기식의 혼합형으로 총 세가지 방식의 환기 설비가 설치되어 있다. 출입문 양측으로 지름 1.27m 크기의 대형 팬과 0.63m 크기의 소형팬이 각각 위치하여 총 4대의 팬이 설치되어 있으며 대형 팬의 경우 on/off 방식에 따라 작동되며 소형팬은 컨트롤러를 이용하여 출력비로 환기량을 조절한다. 측벽에는 윈치커튼이 이중으로 설치되어 있으며 지붕을 따라 설치된 지름 0.1m 크기의 천공형 파이프는 3m, 0.5m의 두 가지 길이의 파이프가 교차로 배치되어 있다. 이러한 천공형 파이프는 건물의 길이방향으로 2m 간격으로 설치되어 있다. 출입구 맞은편 벽면의 경우 폭 1.8m, 높이 0.4m 크기의 개폐식 슬롯형 입기구가 존재하며 1m 높이에 3기, 2.5m 높이에 1기로 총 4개의 입기구가 존재한다. 계사 내부에는 사료 공급용 급이기와 급수대가 설치되어 있으며 급이기는 레일을 이용하여 수직 방향으로 이동이 가능하여 사육기간에는 바닥면에 위치하여 사료를 공급하고 사육이 끝난 후 출하시나 청소 및 내부 소독 등의 작업 시에는 작업의 편의성을 위하여 천정 부분으로 올린다. 또한 계사 내에는 겨울철 시설 내 온도 관리를 위하여 온풍기가 설치되어 있으며 실험 당시 계사는 출하 직후 내부 소독 및 물청소를 마친 상태였으며 바닥은 분뇨와 왕겨를 섞어 발효 중으로 많은 발열과 암모니아가 생성되고 있는 상태였다.

현장 실험을 통한 계사 내의 정량적인 온도 분포 등의 측정을 통하여 본 연구에 적용될 시뮬레이션 모델의 검증 자료를 확보하는데 그 목적이 있으며 환기 팬의 성능 측정, 기상대 설치를 통한 외부 기상 조건 측정 등을 통하여 시뮬레이션 모델의 경계 조건 등으로 활용하고자 하였다.



Fig. 3.1.1. The overview of the broiler house where field-experiment was conducted in Non-san city

나. 실험 방법

실험 계사 인근 광활지에 기상대(Campbell Inc., USA)를 설치하여 실험 기간 동안 온도, 습도, 풍향, 풍속, 일사량, 강우량 등의 기상 자료를 15초 간격으로 모니터링 하였다. 계사 내부의 경우 환기 시스템 작동에 따른 내부 온도 환경 변화를 파악하기 위하여 온도 센서(HOBO sensor, Onset Inc., USA)를 계사 내부 주요 지점에 설치하여 1초 간격으로 온도 변화를 기록하였다. 또한 풍량계를 이용하여 환기 시스템 작동 시 팬 출력에 따른 풍량비를 환기량에 따라 측정하였으며 이때 풍량은 Manometer (TSI Inc., USA)를 이용하여 풍압을 산출한 후 계산하였다. 시뮬레이션의 검증에 위한 실험은 환기 시스템 가동에 따른 온도 분포 값을 토대로 실시되었으며 이때 환기 방식은 실험 당시 하절기 기후 조건에 맞추어 터널 환기 방식을 채택하였다. 계사 내부에 설치된 온도 센서는 계사 길이 방향을 중심으로 좌우 온도 분포가 대칭으로 발생할 것이라는 가정 하에 다음과 같이 설정하였다.

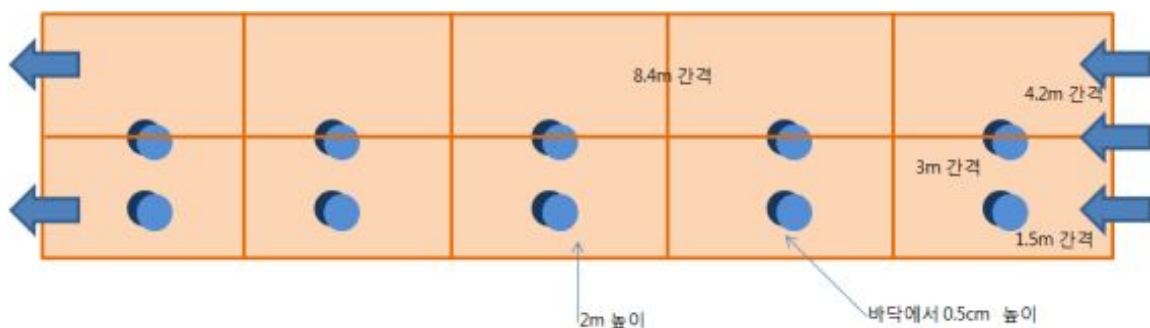


Fig. 3.1.2. Schematic view of installed Hobo sensors for monitor internal air temperature distribution

온도의 측정은 계군 높이를 가정한 0.5m 및 2m 높이에서 측정하였으며 터널 환기 방식을 차용하고 시설 내·외부 공기 유출입을 최소화하기 위하여 윈치커튼을 모두 폐쇄하였으며 천공형 파이프의 각 천공 또한 비닐천 등을 이용하여 폐쇄 하였다.



Fig. 3.1.3. Installing of Hobo sensors

환기팬의 풍량 실험의 경우 터널환기, 천공형 파이프 식, 원치 커튼식 등 각각의 환기 구조를 대상으로 소형팬의 경우 출력비 10, 30, 70, 100%에 대하여 대형 팬의 경우 on/off 작동에 따라 풍량을 측정하였다.



Fig. 3.1.4. Measuring flow rate of ventilation fan of broiler house

2. 전산유체역학 시뮬레이션 모델 설계

시뮬레이션 모델의 검증 및 폐열회수 환기 장치의 적정 위치 결정 등과 관련하여 기존의 터널 환기 방식 및 새로 추가된 네가지 구조를 대상으로 각각의 모델을 설계하였다. 대상 육계사의 경우 총 길이 42m로 총 2기의 폐열회수 환기 장치를 설치하게 되며 각 구조별로 Tracer gas decay 방법 등을 이용하여 각 시설별 실제 환기량을 산출하고자 하였다.

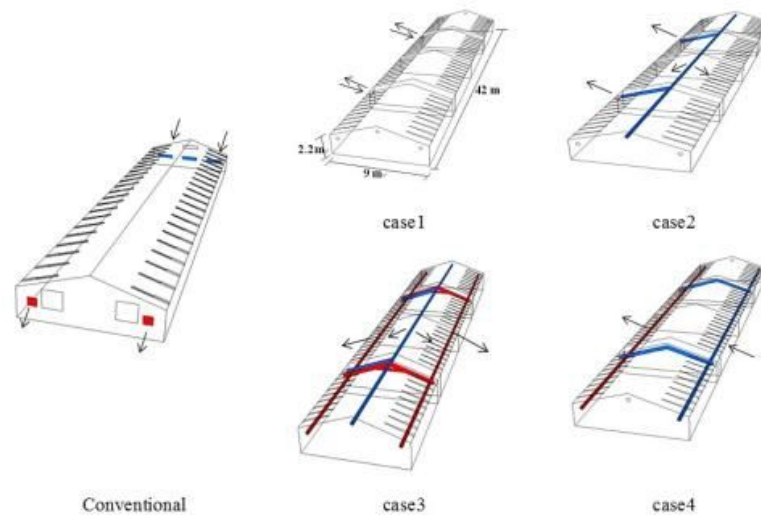


Fig. 3.1.5. Schematic designs of each ventilation system

전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 유동현상을 묘사하는 비선형 편미분 방정식인 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법(Finite volume method, FVM)과 같은 수치 해석 알고리즘을 사용하여 유체의 거동 문제를 해석하는 학문이다. 최근에는 항공·우주, 자동차, 냉·난방 공조, 조선 해양, 분자 확산, 연소 등 다양한 분야에서 널리 활용되고 있으며 최근에는 온실이나 축산 시설, 저장고 등의 농업 시설의 내부 열환경 및 환기 해석 등에 적용되고 있다(Seo et al., 2008; Hong et al., 2008; Kwon et al., 2010; Kwon et al., 2012).

본 연구에서는 연구 대상 계사의 구조 설계 및 연산을 위하여 전산유체역학 상용 소프트웨어인 GAMBIT(ver 2.4, Fluent Co. NewHampsher, USA)을 사용하였으며 구성된 격자 계에 대한 비선형 편미분 방정식의 이산화 및 연산을 위하여 FLUENT(ver 6.3, Fluent Co. NewHampsher, USA)를 사용하였다. GAMBIT은 3차원의 기본적인 외형 제작, 정렬 및 비정렬 격자 계의 구성, 경계 조건 정의 등에 사용되는 GUI(Graphical User Interface) 기반의 프로그램이다(Kwon et al., 2010). FLUENT는 c언어를 기반으로 작성된 상용 프로그램으로 관심 영역에 대하여 작은 스케일의 난류 효과를 시·공간에 대하여 근사화 하는 Reynolds-Averged Navier-Stokes 방정식을 계산한다. 또한 유체 및 에너지의 이동 현상과 관련한 질량, 운동량, 에너지 방정식을 미소 체적에 적용하여 FVM방식에 따라 비선형 연립 편미분 방정식에 대한 해석을 수행한다.

가. 전처리 과정(Pre-processing)

편미분 방정식을 풀이하기 위한 일반적인 수치해석 기법과 마찬가지로 전산유체

역학 기법을 이용하여 관심 영역에 대하여 해석하기 위해서는 다수의 격자로 분할하고 각 격자에 이산화 된 지배 방정식을 풀이하는 과정을 거친다. 전산유체역학을 통한 해를 도출하는 과정에서 격자의 개수 뿐 만 아니라 격자의 품질에 따라 계산 결과의 정확도가 영향을 받으며 이로 인하여 결과의 신뢰성 향상을 위해서는 좋은 품질의 격자 계를 구성하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 3차원 격자망 설계 및 경계 조건의 설정을 위하여 CFD 상용 프로그램인 GAMBIT(ver. 2.4, Fluent Co., NewHampsher, USA)를 사용하였다. GAMBIT은 2차원 혹은 3차원의 기본적인 대상 영역의 외형 및 격자망을 설계하고 경계 조건 정의에 사용되는 그래픽유저인터페이스(Graphical user interface, 이하 GUI) 기반의 프로그램이다. 해석하고자 하는 유계사 영역의 기본 골격을 3차원 형태로 설계하고 계군, 덕트, 환기 팬, 입기 슬롯 등과 같은 세부 구조를 설계한 후 유한개의 3차원 격자망을 구성한다. 격자는 크게 정렬 및 비정렬 격자계로 구분되며 정렬 격자 계(Structured Grids)는 격자 위치가 계산 영역에서 규칙적으로 배열된 형태로 표현되는 구조로써 격자 형상은 2차원의 경우 사각형, 3차원의 경우 육면체의 형태로 구성된다. 비정렬 격자 계(Unstructured Grids)는 계산 영역을 삼각형 혹은 사면체로 구성하며 필요에 따라 다른 형태의 요소와 혼합하여 구성할 수 있다. 최근에는 형상이 복잡한 대상을 해석함에 따라 정렬 격자 계를 구성할 수 없는 경우 비정렬 격자 계를 구성하는 사례가 늘어나고 있다.

나. 수치 해석 모듈

본 연구에서는 구성된 격자 계에 대한 비선형 편미분 방정식의 이산화 및 풀이를 위하여 전산유체역학 상용 프로그램인 FLUENT(ver. 6.3, Fluent Co. NewHampsher, USA)를 사용하였다. FLUENT는 c언어를 기반으로 작성된 상용 프로그램으로써 동적인 메모리 할당, 효율적인 데이터 구조 체계 수립 및 유연한 계산 제어가 가능하며 관심 영역에 대하여 유체 및 에너지의 이동 현상과 관련한 질량, 운동량, 에너지 방정식을 미소 체적에 적용하여 FVM 방식에 따라 비선형 연립 편미분 방정식에 대한 연산을 수행한다. FLUENT는 계산 영역에 대하여 매우 작은 스케일의 난류 효과를 시·공간에 대하여 지배 방정식 수준에서 근사화하는 모델링 기법을 사용하며 그 중 대표적인 방법이 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식 및 이에 따른 난류 모델링이다. 최근에는 RANS 모델로써 해석할 수 없었던 작은 비정상성을 포착할 수 있는 Large Eddy Simulation(LES) 난류 모델 등이 추가되는 등 이에 대한 연구 및 응용이 활발히 진행되고 있는 바이다. FLUENT를 통하여 풀이하는 질량, 운동량, 에너지에 대한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\text{Mass} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{\nu}) = S_m \quad \text{식 (3.1.1)}$$

$$\text{Momentum} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nu}) + \nabla \cdot (\rho \vec{\nu} \vec{\nu}) = -\nabla P + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad \text{식 (3.1.2)}$$

$$\text{Energy} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{\nu}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau} \vec{\nu})) + S_h \quad \text{식 (3.1.3)}$$

여기서 ρ 는 밀도($kg m^{-3}$), t 는 시간(s), ν 는 속도($m s^{-1}$), S_m 는 화학반응에 의해 생성되는 질량 소스($kg m^{-2}$), P 는 정압($kg m^{-1} s^{-2}$), τ 는 응력 텐서($kg m^{-1} s^{-2}$), \vec{g} 는 중력 가속도($m s^{-2}$), \vec{F} 는 외력 ($kg m s^{-2}$), E 는 총 에너지($kg m^2 s^{-2} kg^{-1}$), k_{eff} 는 유효 전도율($kg m^{-1} s^{-3} K^{-1}$), T 는 온도(K), h_j 는 j 종의 현열 엔탈피($kg m^{-2} s^{-1}$), \vec{J}_j 는 j 종의 확산 플럭스($kg m^{-2} s^{-1}$), S_h 는 화학반응이나 복사에 의한 엔탈피 증가($kg m^{-1} s^{-3}$)를 의미한다.

본 연구의 시뮬레이션 모델의 경계조건으로 사용된 각각의 물성치 및 특성치는 다음과 같다.

Table 3.1.1. Constant values for CFD simulation model

Parameter		Value	Unit
Incoming air temperature	Conventional	0 (273)	°C (K)
	Designed cases	10 (283)	°C (K)
Inside air temperature	Conventional	20 (293)	°C (K)
	Designed cases	25 (298)	°C (K)
Density of air		1.225	kg m ⁻³
Viscosity of air		1.86 e-05	kg m ⁻¹ s ⁻¹
Thermal conductivity of air		0.02647	W m ⁻¹ K ⁻¹
Specific heat of air		1006.43	J kg ⁻¹ K ⁻¹
Mass diffusivity of air		2.262 e-05	M2 s ⁻¹
Molecular weight of air		28.966	g mol ⁻¹
Gravitational acceleration of air		9.81	m s ⁻¹
Atmospheric pressure		101.325	kPa
Outside CO ₂ concentration		0.00061(400)	Mass fraction (ppm)
Inside CO ₂ concentration		0.003 (2000)	Mass fraction (ppm)
Designed ventilation rate		0.089	Air exchanger min-1

다. 환기량 계산 방법

기존의 환기량 계산 방법의 경우 시설 전체의 환기량을 하나의 대푯값으로만 산출할 뿐만 아니라 지역적인 환기 특성을 표현할 수 없다는 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 최근 농업 시설의 전체 및 지역적인 환기량 분석에 활용되고 있는 Tracer gas decay method (이하 TGD)를 적용하였다. 시뮬레이션 수치 해석 시 초기 조건으로 해석 대상 영역 내부에 추적가스를 균일하게 가득 차 있다고 가정 한 후 환기 시스템의 작동에 따라 시설 내부에 존재하는 추적가스 농도가 희석되어 가는 농도 추이를 모니터링하여 다음 식을 토대로 계산 영역 전체 및 국소 영역에 대한 환기량을 산출할 수 있다.

$$AER = \frac{\ln\left(\frac{C_0}{C}\right)}{(t-t_0)} \times 60, \text{ min}^{-1} \quad \text{식 (3.1.4)}$$

여기서, C_0 : Initial concentration, mass fraction; C : Gas concentration, mass fraction, t, t_0 : time, sec.

3. 현장 실험 결과

환기 시스템 작동에 따른 지역 별 온도 데이터를 획득하기 위한 현장 실험은 다음 표와 같이 3차례에 걸쳐 반복적으로 실시하였다. 1차, 3차 실험의 경우 환기팬의 50% 출력에 대하여 실시하였으며 2차 실험의 경우 환기팬의 출력을 100%로 적용하였다. 실험 기간 동안 외부 온도는 26.1~28.8℃로 분포하였다.

Table 3.1.2. External and Internal air temperature according to experiment periods

	Time duration hh:mm		Air temperature , °C					
			External	Low	Avg.	High	Lowest	Highest
Ventilation Period	1st	12:11~ 12:25	28.3	29.6	30.2	30.7	28.7	30.7
	2nd	14:43~ 15:10	26.4	29.1	30.9	32.0	27.9	33.6
	3rd	16:15~ 16:35	27.7	30.9	32.0	32.7	29.5	33.2

계사 내부 온도의 경우 환기팬이 100% 출력으로 가동되었을 2차 실험 당시 27.9℃로 상대적으로 낮은 온도를 보였으며 온도 편차 또한 2차 실험때 크게 발생하는 것으로 나타났다.

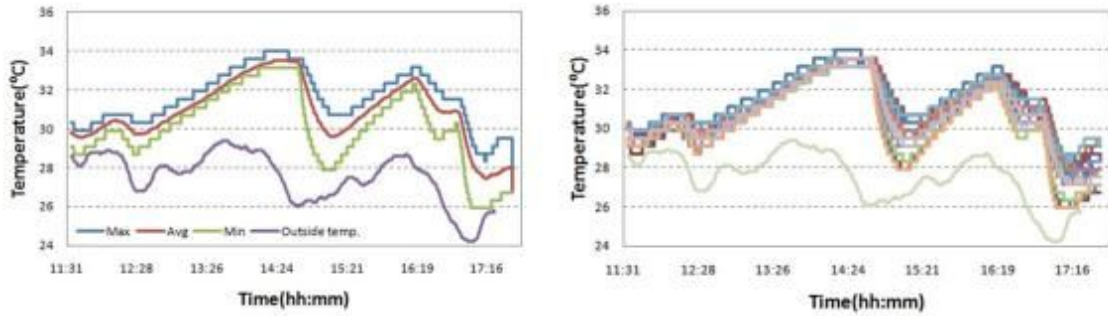


Fig. 3.1.6. Air temperature distribution through the whole experiment period

상기 그래프는 실험 동안 계사 내부 및 외부 온도 변화 추이를 나타낸 것으로써 환기팬을 가동하지 않는 동안에는 계사 내부의 온도가 내부 발열 등으로 인하여 지속적으로 상승하였으며 환기팬 가동 시 다시 계사 내부의 온도가 급격히 하강하는 양상을 보였다.

1차 실험의 경우 환기팬의 출력을 50%로 설정하였으며 환기팬 가동 전 계군 내 평균 온도는 30.4°C, 14분 동안의 환기팬 가동 시 평균 29.9°C의 온도 분포를 보였다. 이는 환기에 의하여 외부로 배출되는 열에너지 등을 고려하였을 때 예상치보다 다소 낮은 값이었는데 이는 환기팬을 가동시키는 동안 내·외부 온도차가 2°C 정도로 그리 크지 않았으며 지속적으로 바닥에서 열과 암모니아 등이 발생하였기 때문에 그 감소폭이 적게 나타난 것으로 판단된다.

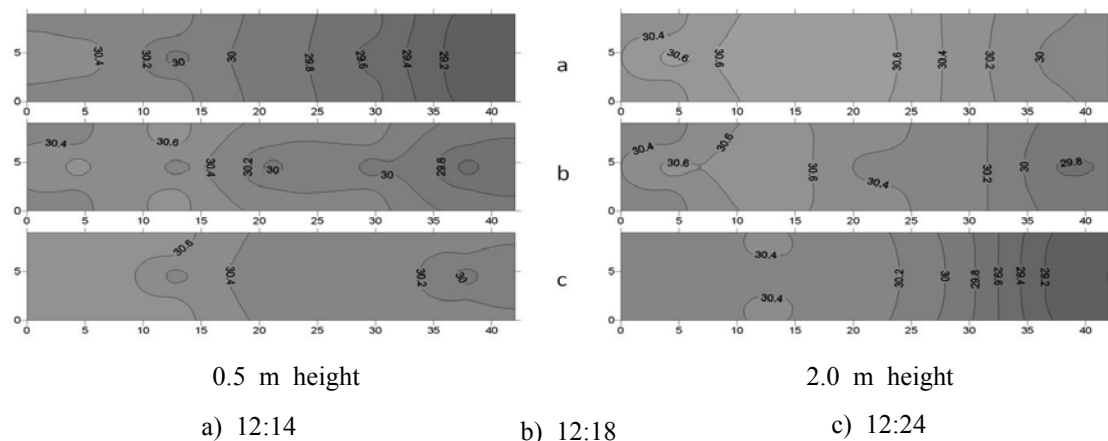


Fig. 3.1.7. Contour of air temperature distribution of 1st experiment according to the monitoring height

2차 실험의 경우 환기팬의 출력을 100%로 가동하였으며 온도의 감소폭은 1차 실험에 비하여 33.6°C에서 30.7°C 정도로 상대적으로 크게 나타났다.

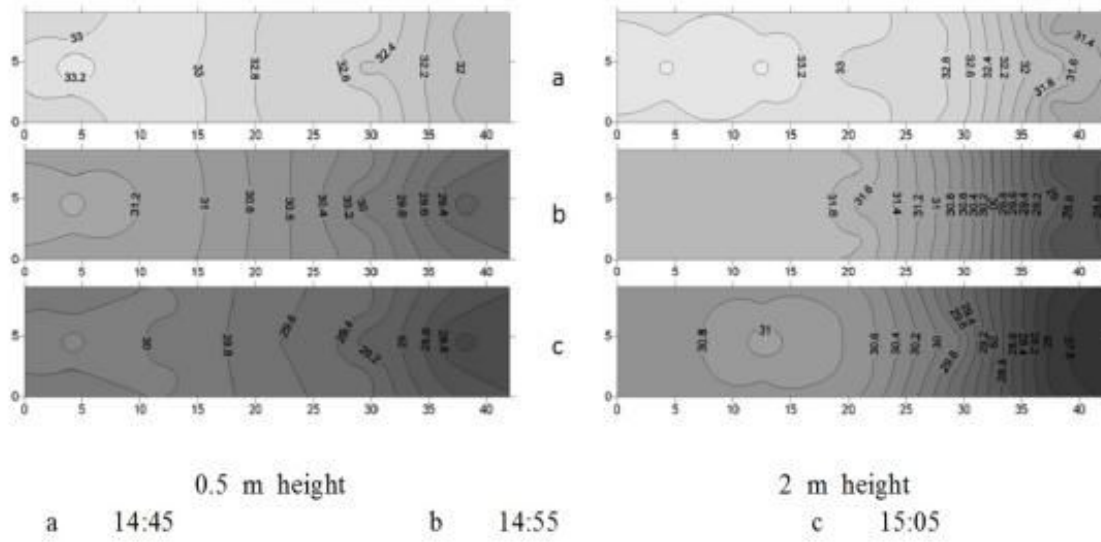


Fig. 3.1.8. Contour of air temperature distribution of 2nd experiment according to the monitoring height

3차 실험의 경우 환기팬의 출력을 50%로 적용하였으며 19분 동안의 환기 가동 시간 동안 1.2°C 가량의 온도 하락을 보였다.

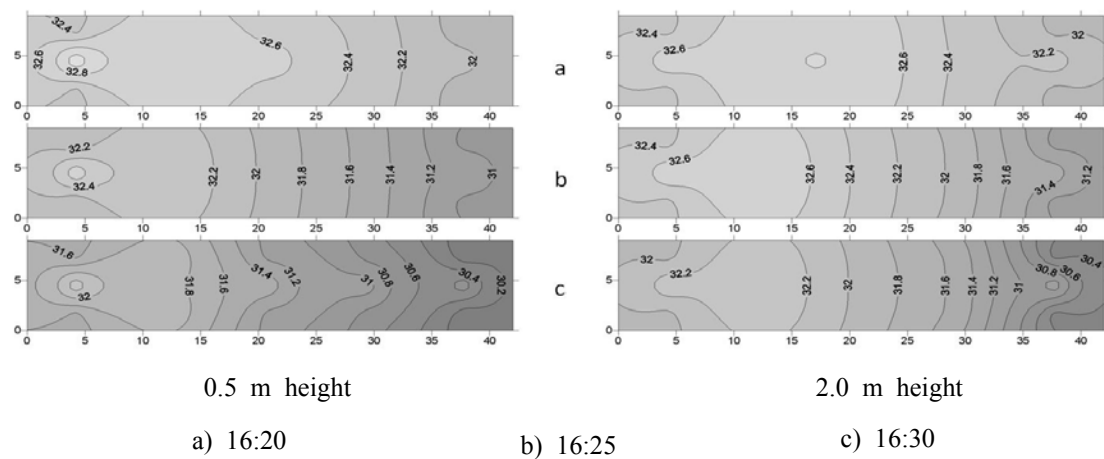


Fig. 3.1.9. Contour of air temperature distribution of 3rd experiment according to the monitoring height

Manometer 및 풍량 측정기 등을 통하여 환기팬 가동 출력 및 환기 방법에 따른 풍량 측정 결과는 다음과 같다.

Table 3.1.3. Measured flow rate of ventilation fans according to the ventilation method

		Air flow rate							
		CFM				m ³ /hr			
		100%	70%	30%	10%	100%	70%	30%	10%
1 Small fan	Pipe	7522	6547	4562	3431	12779	11124	7750	5829
	Winch	7707	6564	4084	2951	13095	11152	6939	5013
	Slot	7393	6326	4106	2994	12560	10748	6975	5088
1 Large fans	Pipe	13123	-	-	-	22295	-	-	-
	Winch	16609	-	-	-	28218	-	-	-
	Slot	15573	-	-	-	26459	-	-	-
2 Small fans	Pipe	15044	13094	9124	6862	25558	22248	15500	11658
	Winch	15414	13128	8168	5902	26190	22304	13878	10026
	Slot	14786	12652	8212	5988	25120	21496	13950	10176
2 Small fans + 1 Large fan	Pipe	28167	26217	22247	19985	47853	24543	37795	33953
	Winch	32023	29737	24777	22511	54408	50522	42096	38244
	Slot	30359	28225	23785	21561	51579	47955	40409	36635
2 Small fans + 2 Large fans	Pipe	41290	39340	35370	33108	70148	46838	60090	26248
	Winch	48632	46346	41386	39120	82626	78740	70314	66462
	Slot	45932	43798	39358	37134	78038	74414	66868	63094

이를 시간당 공기 교환량 즉, 환기량으로 환산하면 다음과 같다.

Table 3.1.4. Ventilation rate of fans according to the ventilation method

Fan Power, %	Ventilation rate, min ⁻¹								
	2 Small fans			2 Large fans			2 Small + 2 Large fans		
	Pipe	Winch	Slot	Pipe	Winch	Slot	Pipe	Winch	Slot
100	0.376	0.386	0.370	0.658	0.834	0.782	1.034	1.22	1.152
70	0.328	0.328	0.316	-	-	-	0.986	1.162	1.098
30	0.228	0.204	0.206	-	-	-	0.886	1.038	0.988
10	0.172	0.148	0.1502	-	-	-	0.83	0.982	0.932

4. CFD 시뮬레이션 모델의 검증

현장 실험을 통하여 계사 내부에서 환기 시스템 가동에 따라 측정된 내부 온도 분포를 토대로 CFD 시뮬레이션 모델의 정확도를 판정하고자 하였다. 시뮬레이션 모델의 정확도는 상대 오차(E) 및 현장 실험 치 및 시뮬레이션 결과의 오차(E_b)는 다음과 같이 계산한다.

$$E = \frac{T_{CFD} - T_m}{T_m} \quad \text{식 (3.1.5)}$$

$$E_b = \frac{T_{CFD} - T_m}{T_i} \quad \text{식 (3.1.6)}$$

여기서, T_{CFD} : CFD 시뮬레이션을 통하여 산출한 각 지역별 온도 결과, K; T_m : 실험을 통하여 측정된 각 지역별 온도 결과, K; T_i : 유입구에서 측정된 공기 온도, K

계사 내 각 지역별 공기 온도 측정치에 대한 시뮬레이션 결과와의 오차 결과는 다음과 같다.

Table 3.1.5. The absolute values for the relative error and the error between measured and simulated air temperature at each sensor position

No.	60 sec					
	0.5 m height			2 m height		
	$T_m - T_{CFD}$	E (%)	$E_b(\%)$	$T_m - T_{CFD}$	E (%)	$E_b(\%)$
1	0.08	0.03	0.03	0.08	0.03	0.03
2	0.34	0.11	0.11	0.34	0.11	0.11
3	0.08	0.03	0.03	0.08	0.03	0.03
4	0.04	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
5	0.49	0.16	0.16	1.29	0.42	0.42
6	0.34	0.11	0.11	0.34	0.11	0.11
7	0.08	0.03	0.03	0.34	0.11	0.11
8	0.08	0.03	0.03	0.09	0.03	0.03
9	0.12	0.04	0.04	0.28	0.09	0.09
10	0.59	0.19	0.20	1.42	0.46	0.47
11	0.08	0.03	0.03	0.08	0.03	0.03
12	0.34	0.11	0.11	0.34	0.11	0.11
13	0.08	0.03	0.03	0.08	0.03	0.03
14	0.03	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
15	0.50	0.16	0.16	1.27	0.42	0.42

실험 계시 시설을 대상으로 구현한 CFD 시뮬레이션 모델을 통한 내부 환경 해석 모의 후 각 지역별 계측 자료를 토대로 현장 실험치와 비교한 결과 상대 오차는 0.5m 높이에서 0.65%, 2m 높이에서 0.13%의 결과를 보였다.

5. CFD 시뮬레이션을 통한 구조 별 환기량 산출

TGD 방법을 통하여 산출한 계사 영역 전체에 대한 환기량은 터널 환기 방식을 제외한 모든 구조에서 $0.92 \sim 0.96 \text{ min}^{-1}$ 범위의 값을 보였다. 터널 환기 방식의 경우 타 구조에 비하여 거의 2배에 가까운 환기량 값을 보였으며 계군에서의 공기 교환량 또한 0.249 min^{-1} 정도의 값을 보여 절대적인 공기 교환량 수치가 높은 결과를 보였다. 계군에서의 지역별 환기량을 검토해볼 경우 터널식 환기 방식을 채택할 경우 그 편차가 상대적으로 크게 나타나는데 이는 덕트 시스템을 이용한 환기 방식이 지역적인 균일성에서 보다 우수함을 의미한다. 계군 내 환기량은 구조 4가 터널 환기

뒤를 이었으며 터널 환기의 환기량 수치의 약 54% 수준으로 나타났으며 기타 환기 구조들의 경우 구조 1, 2, 3 순으로 각각 터널 환기 방식의 환기량 대비 41%, 45%, 43% 수준으로 나타났다.

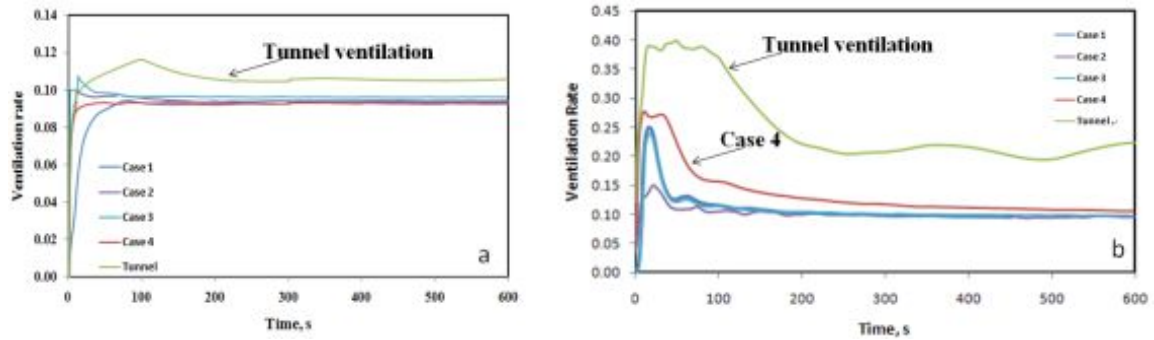


Fig. 3.1.10. Computed ventilation rate of whole zone and broiler zone according to the ventilation configurations

Table 3.1.6. Computed average ventilation rate according to the ventilation configuration (min^{-1})

Zones	Designed vent. rate	Tunnel	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Broiler zone	0.089	0.249	0.102	0.110	0.107	0.134
Whole zone		0.106	0.092	0.093	0.096	0.093

덕트 환기 방식의 경우 TGD 방법을 통하여 계산된 계군 내 실제 환기량은 설계 환기량 (0.089min^{-1})과 비교하여 각각 14.5%, 23.5%, 20%, 51% 높게 나타났다.

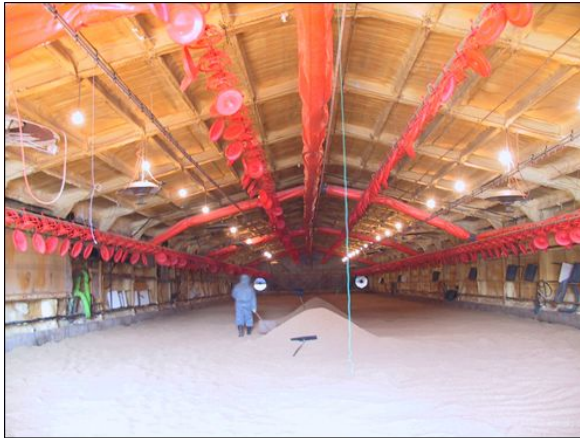
제 2 절 전산유체역학 기법을 이용한 국내 일반 강제 환기 육계사 환기 시스템 및 HRV 환기 시스템 적용 계사의 열효율 평가

1. 실험 대상 육계사 제원

연구 대상 계사는 충청북도 음성군 삼성면 청용리 375번지에 위치하는 무창계사로서 총 2동의 건물이다. 계사 각 동의 크기는 폭 13.5m, 길이 76m, 처마 높이 3.5m, 지붕 최고점 높이 5.5m이며 지붕 및 측벽은 우레탄으로 단열 처리되어 있다. 1회 사육두수는 약 22,000마리이며 연 최대 6회 사육을 실시하고 있다.



Fig. 3.2.1. 충청북도 음성군 소재 무창계사 2동; a 동: HRV 시스템 설치, b 동: 크로스 환기 팬 및 슬롯형 입기구 등의 일반 환기 시스템 (동절기 기준)



(a) ERV 설치동



(b) 기존환기시스템 이용동

Fig. 3.2.2. 폐열회수 환기 장치 설치 동 (a) 및 일반 크로스 강제 환기 시스템 이용 동 (b)

계사의 입구에는 폭 6m, 높이 4m의 슬라이드 형 출입문이 설치되어 있으며 각 계사 후면에는 직경 47인치 터널 환기용 배기팬이 9개씩 설치되어 하절기 터널 냉방을 위하여 사용된다. 계사 한쪽 측벽에는 폭 600mm, 높이 600mm 정사각형 형태의 크로스 배기팬이 일정한 간격으로 5개가 설치되어 on/off 방식으로 동절기 최소 환기를 위하여 사용된다. 입기구의 크기 및 개수는 각 동이 상이하며 a동 급기구 슬롯의 경우 폭 550mm, 높이 250mm이고 좌측에 51개, 우측에 19개 설치되어 있으며 b동의 경우 폭 540mm, 높이 130mm의 급기구가 좌측에 25개 우측에 70개 설치 및 개방되어 있다. 입구 측 측벽에 부착된 쿨링 패드는 여름철 실내온도가 높아질 경우 실내로 공급되는 외기 온도를 낮추는 역할을 한다. 동절기의 경우 한 쪽 측벽에 설치된 5기의 배기 팬을 이용하여 음압식으로 양쪽 측벽에 설치되어 있는 입기 슬롯을 통하여 외부의 신선한 외기를 주입하는 형태로 환기가 운영된다.



Fig. 3.2.3. 터널식 배기팬 전경



Fig. 3.2.4. 측벽에 설치된 크로스 배기팬



Fig. 3.2.5. 측벽의 우레탄 단열 모습



Fig. 3.2.6. 측벽 외부 전경



Fig. 3.2.7. 입기 슬롯



Fig. 3.2.8. 입기 슬롯 및 사료 급이기

2. 계군 발열량

일반적으로 가축으로부터 발현되는 열량을 산정하는데 있어서 대부분의 연구에서 가축을 상시 발열체 및 가축 자체의 체온 유지 등의 이유로 항온체로 가정하고 있다. 동물군의 실제 발열량은 사료 섭취량, 음수량, 가축의 체중 등과 밀접한 연관이 있으며 또한 가축 개체와 그 주변 공기와의 온도 구배, 차갑거나 뜨거운 물체의 복사 방사량, 주변 공기 유속 등에 따른 생리 현상에 직결된다. 20℃의 대기 중 주변 온도를 기준으로 다양한 경험식 혹은 실험식들이 도출되어 온 바 있으며 닭 등과 같은 가금류의 경우 각 개체의 중량의 함수로써 표현되어 오고 있다. 그 중 Storm(1978)은 실험실 조건에서 닭 발열량에 대하여 20℃ 및 그 외 온도에 대하여 다음과 같은 식을 각각 제시하고 있다.

$$20^{\circ}\text{C} : Q_t = am^{0.5} \quad \text{식 (3.2.1)}$$

$$\text{그 외 온도} : Q_t = 10m^{0.5}(4 \times 10^{-5}(20-t)^3 + 1) \quad \text{식 (3.2.2)}$$

여기서 Q_t 는 닭의 열 발생량, W, a 는 실험값에 의한 상수 대개 10, m 는 가축 개체 당 평균 중량, kg, t 는 가축 개체 주변 온도, $^{\circ}\text{C}$ 를 의미한다.

또한 CIGR(1984)에서는 가축의 종류 별 조건 별 발열량에 대하여 정리한 바 있으며 닭의 경우 다음과 같은 가축 중량 및 주변 온도의 함수로써 제시한 바 있다.

$$Q_t = 10m^{0.75}(4 \times 10^{-5}(20-t)^3 + 1) \quad \text{식 (3.2.3)}$$

2002년에는 20°C 온도 조건에 대하여 식 3.2.4를, 그 외 온도에 대해서는 닭 외에 모든 가축 개체에 대한 실험식을 식 3.2.5과 같이 제시한 바 있다.

$$20^{\circ}\text{C} : Q = 10.62m^{0.75} \quad \text{식 (3.2.4)}$$

$$\text{그 외 온도} : Q_t = 1000(1 + 4 \times 10^{-5}(20-t)^3) \quad \text{식 (3.2.5)}$$

본 연구에서는 CIGR(1984)에서 제시한 일령 별 닭의 평균 중량 및 주변 온도의 함수로 이루어진 식 3.2.3을 채택하였다.

(주) 하림으로부터 얻은 닭의 일령 별 적정 기대 온도 및 습도 조건, 설계 환기량 기준은 표 (1)과 같으며, 음성 육계사 사육 개체 수 및 사육 밀도를 반영하여 계산한 일령 별 평균 중량 및 단위 면적 당 발열량은 다음과 과 같다.

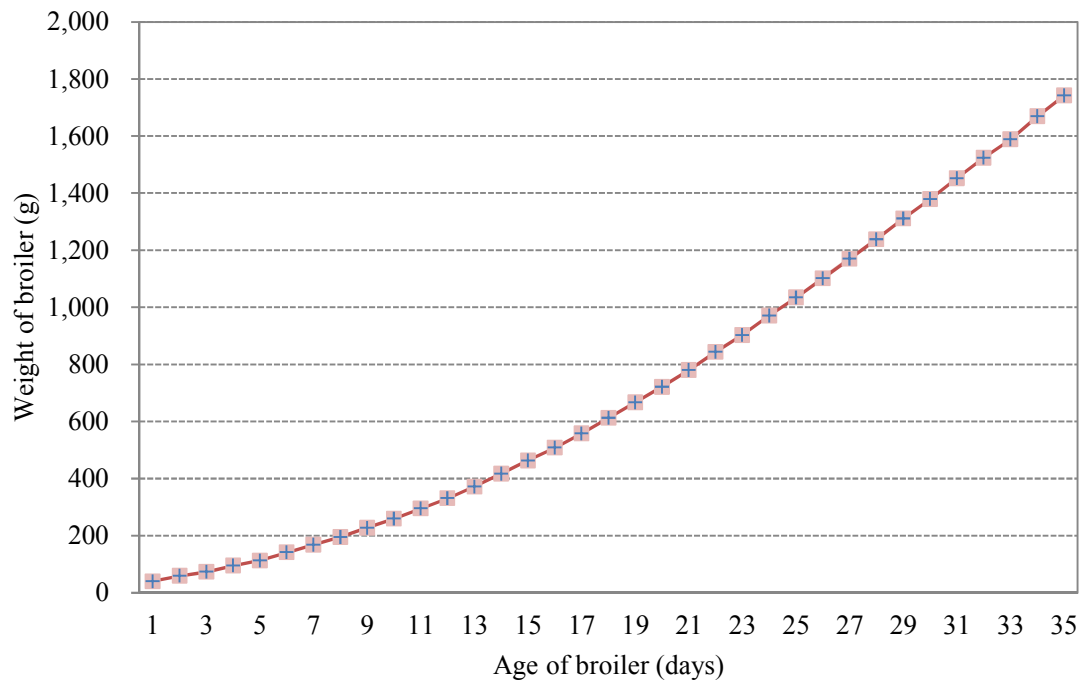


Fig. 3.2.9. 닭 생육 일령에 따른 평균 중량 추이 (하림)

Table 3.2.1 2만수 육계사 기준 일령 별 기대 적정 온도 및 설계 환기량, 평균 중량 등
(㈜하림 제공)

2만수 육계사 기준							
일령	온도	습도	최소환기량기준 (야간외 기온도기준)-CMH			평균 음수량 (리터/일)	평균 중량 (g/수)
			영하1도 이하	영하1도- 15.5도	15.5도이 상		
1	32.0	70%	2,100	2,500	3,400	648	40
2	32.0	70%	2,100	2,500	3,400	697	59
3	32.0	70%	2,100	2,500	3,400	802	73
4	32.0	70%	2,100	2,500	3,400	934	95
5	32.0	70%	2,100	2,500	3,400	1,017	113
6	29.5	70%	2,500	3,400	4,200	1,104	141
7	29.5	70%	2,500	3,400	4,200	1,169	168
8	28.5	65%	3,700	5,100	5,900	1,300	195
9	28.5	65%	3,700	5,100	5,900	1,421	227
10	27.5	65%	5,100	5,900	6,800	1,542	259
11	27.5	65%	5,100	5,900	6,800	1,714	295
12	26.5	65%	5,900	6,800	7,600	1,842	331
13	26.5	65%	5,900	6,800	7,600	1,962	372
14	26.0	65%	6,800	8,500	9,300	2,081	417
15	26.0	60%	6,800	8,500	9,300	2,214	463
16	25.0	60%	8,500	10,200	11,000	2,338	508
17	25.0	60%	8,500	10,200	11,000	2,454	558
18	24.0	60%	10,200	11,000	12,700	2,684	612
19	24.0	60%	10,200	11,000	12,700	2,831	667
20	23.5	60%	11,000	12,700	14,400	2,920	721
21	23.5	60%	11,000	12,700	14,400	3,074	780
22	23.0	60%	12,700	14,400	16,100	3,303	844
23	23.0	60%	12,700	14,400	16,100	3,529	903
24	22.5	60%	13,600	15,300	17,800	3,657	971
25	22.5	60%	13,600	15,300	17,800	3,814	1,034
26	22.0	60%	14,400	17,000	19,500	4,001	1,102
27	22.0	60%	14,400	17,000	19,500	4,108	1,170
28	22.0	60%	15,300	18,700	21,200	4,379	1,238
29	22.0	60%	15,300	18,700	21,200	4,536	1,311
30	21.5	60%	15,700	21,200	22,900	4,673	1,379
31	21.5	60%	15,700	21,200	22,900	4,857	1,452
32	21.5	60%	17,400	22,900	24,600	5,034	1,524
33	21.5	60%	17,400	22,900	24,600	5,257	1,588
34	21.0	60%	18,700	23,800	26,300	5,458	1,669
35	21.0	60%	18,700	23,800	26,300	5,579	1,742

Table 3.2.2 11일령, 25일령에 따른 적정 기대 온도, 환기량, 단위 면적당 닭 발열량 계산 값

	11일령	25일령
기대온도	27.5℃	22.5℃
적정 환기량	5,100CMH	13,600CMH
평균 중량	295 (g/수)	1,034 (g/수)
단위면적 당 발열량	84.47W	219.76W

3. CFD 시뮬레이션을 이용한 일반 강제환기식 계사 및 HRV 환기 시스템 적용 계사 열효율 평가

가. CFD 시뮬레이션 모델 설계

연구 대상 지역인 충청북도 음성군에 위치한 육계사 2동에 대하여 CFD 전처리 툴인 GAMBIT을 이용하여 해당 영역에 대한 외부 형상 및 환기구조 등의 세부 구조 설계 및 수치해석을 위한 격자망을 구성을 실시하였다.

HRV 환기 시스템이 설치되어 있는 (a)동의 경우, 설계 도면에 따라 HRV 시스템, 중앙 환기 덕트, 우측 환기 덕트, SED 시스템, 추가 배기구 등을 구현하였다. 계산 영역을 구성하는 격자망의 품질 향상 및 경제적인 시뮬레이션 연산 시간(현재 병렬 연산을 통하여 처리할 수 있는 데이터량을 고려) 등을 고려하여 HRV 시스템과 우측 덕트, SED 시스템과 중앙 덕트를 연결하는 폭 방향 분기 덕트의 외형은 생략하였으며 이는 시뮬레이션 상 UDF(User defined function) 등과 같은 추가적인 모듈을 활용한 경계 조건 정의를 통하여 실제 운영 방식과 동일하게 작동할 수 있도록 설계하였다. HRV 시스템은 총 3기가 한쪽 측벽 방향에 일정 간격으로 배치되어 있으며 지상으로부터 약 1.5m 높이에서부터 설치 되어 있다. 총 3기 중 출입문에 가장 인근하여 배치된 HRV 시스템의 경우 출입문 인근 측벽에 설치되어 있는 쿨링 패드로 인하여 중앙 측으로 약간 치우쳐 설치되어 있으므로 이는 추가 덕트의 설비를 통하여 간격을 일정하게 조절하고자 하였다. HRV 시스템은 급기 및 배기가 동시에 이루어지며 각 기기 당 3,000CMH의 설계 풍량을 지니고 있으며 배기구는 직경 300mm의 평덕트로 구성되어 있다. HRV 시스템이 설치된 측벽과 반대쪽 측벽 인근, 즉 우측 지붕 하단 및 벽면 인근에 설치되어 있는 덕트의 경우 직경 300mm의 평덕트로써, HRV 시스템으로부터 가열된 외기가 분배되며 시설 내부 중

양 쪽으로 유입구가 일괄적으로 편칭되어 있어 입기류가 중앙으로 유도되게끔 설치되어 있다. 유입구는 지름 50mm의 크기로 400mm 간격으로 한 방향으로 편칭되어 있다. 균일성 향상을 위한 내부 순환 효과 및 외기 유입을 위한 SED 시스템의 경우 총 3기가 설치되어 있으며 1기당 3,600CMH 풍량의 팬이 2기씩 장착되어 있다. 지붕 중앙 하단에는 SED 시스템을 통하여 내부 순환되는 기류 혹은 유입된 외기가 분배되는 덕트가 시공되어 있으며 우측 측벽에 설치된 덕트와 동일하게 직경 300mm의 평덕트로 구성되어 있으며 지름 5mm 크기의 입기구가 양측으로 400mm 간격으로 편칭되어 있다. 또한 9,000CMH 기준 그 이상의 환기량이 적용 될 경우 추가 배기를 위한 추가 배기구가 총 6기 설치되어 있으며 각각의 설계 풍량은 3,600CMH이다. HRV 시스템이 설치되어 있는 (a) 동에 대하여 GAMBIT을 통하여 설계한 시뮬레이션 모형은 다음 그림과 같다.

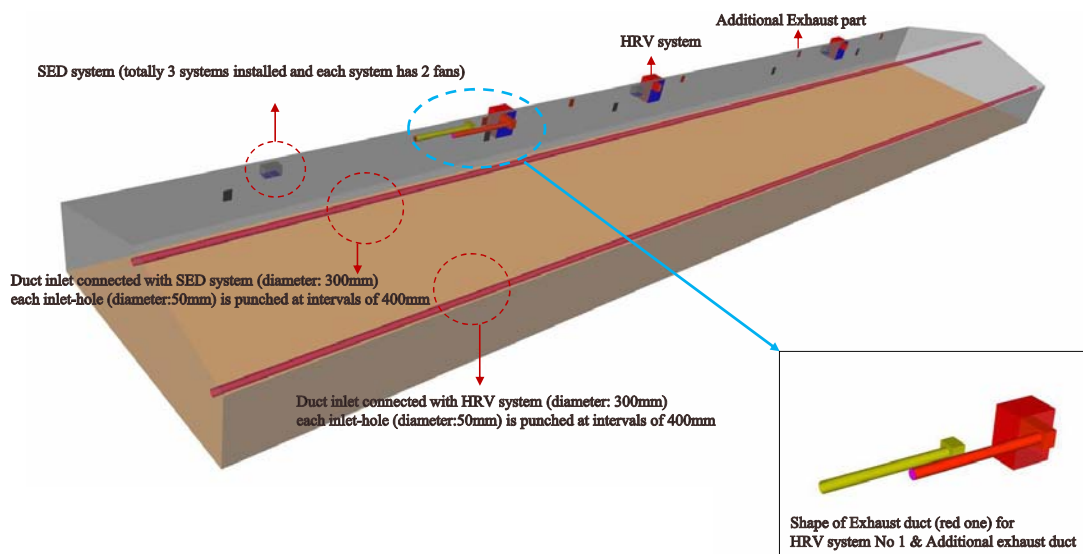


Fig. 3.2.10. GAMBIT을 이용하여 설계한 HRV 설치 육계사 (a) 동 외형 모습

기존 일반 환기 시스템 즉 한쪽 측벽에 설치되어 있는 팬을 이용한 배기, 입기 슬롯을 이용한 입기 방식의 (b)동의 경우, GAMBIT을 이용하여 설계한 육계사의 외형은 다음 그림과 같다. 배기 팬은 높이 600mm, 폭 600mm의 사각 프레임에 맞추어 총 5기가 설치되어 있으며 측벽 상단에 설치되어 있는 슬롯형 입기구 71개 중 10개가 개방되어 있으며 배기팬이 설치되어 있지 않은 반대쪽 측벽의 경우 총 30개의 슬롯형 입기구가 개방되어 있다. 유입구의 각도는 바닥과 평행과 평면으로부터 20도의 각도로 설치되어 입기되는 기류의 방향을 유도하게끔 설치되어 있다.

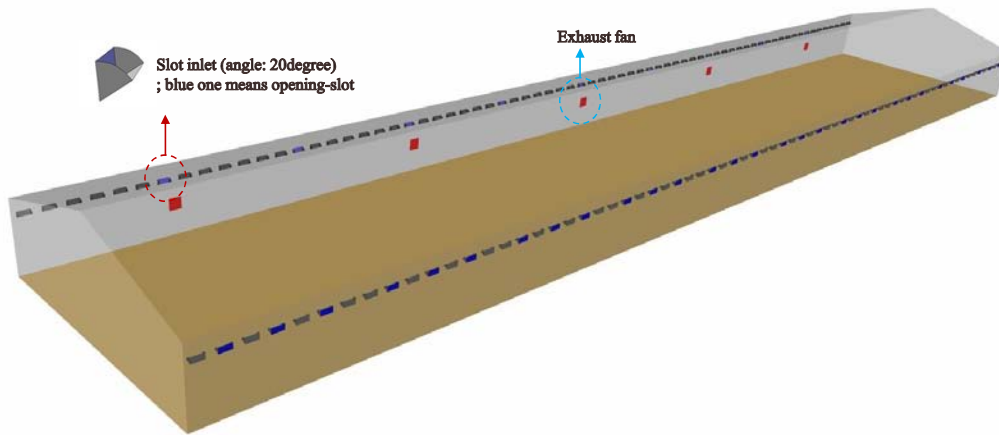


Fig. 3.2.11. GAMBIT을 이용하여 설계한 일반 환기 시스템 이용 (b) 동 외형 모습

격자망 구성의 경우 수치 연산에 있어서 정확도를 필요로 하는 덕트 및 슬롯 입기구 인근 부근, 배기구 인근에서는 약 1cm 크기로 곡면 등 물리적인 형상을 고려하여 사면체의 조밀한 격자망을 구성하였으며 그 외 영역 즉 지붕 하단 및 바닥 부등에서는 5~8cm 크기로 육면체 형태의 비교적 성근 격자망을 구성하여 경제적인 연산 수행 시간을 고려하고자 하였다. 구성된 격자망의 총 개수는 약 270만개 정도이다.

나. 시뮬레이션 환경 조건 구성

적절한 난류 모델의 선택은 CFD를 이용한 유동 해석에 있어서 해의 수렴성에 가장 큰 영향을 미치는 요인이다. 본 연구에서는 Lee 등(2005)에 의하여 수행된 농업 시설을 대상으로 한 풍동 실험과 PIV(Particle Image velocimeter) 실험 결과 및 CFD 시뮬레이션 결과의 비교 분석 연구를 통하여 그 결과 가장 높은 신뢰도를 보인다고 판단한 RNG $k-\epsilon$ 난류모델을 선택하였다. RNG $k-\epsilon$ 난류모델은 Re-normalization group theory라고 일컬어지는 일종의 통계적 처리를 거쳐 난류 동적 에너지 및 그에 대한 소산율에 대하여 풀이하는 모델로써, 기존의 Standard $k-\epsilon$ 난류 모델과 유사하나 k 와 ϵ 값을 보정하여 거칠고 빠른 유동 및 와류 유동 해석에 있어서 더 높은 해의 정확도를 보유하고 있다. 해당 난류 모델에 대한 구체적인 수송 방정식은 다음과 같다(Fluent manual, 2011).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_k u_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad \text{식 (3.2.6)}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) \\ & = \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_\epsilon u_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + G_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_{3\epsilon} G_b) - G_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \end{aligned} \quad \text{식 (3.2.7)}$$

여기서, k 는 난류 동적 에너지, ϵ 는 k 에 대한 소산율, G_k 는 평균 속도 구배에 의한 난류 동적 에너지의 생성, G_b 는 부력에 의한 난류 동적 에너지의 생성, Y_M 은 전체 확산과정에서 압축성 난류의 변동하는 팽창 정도를 의미하며 $\alpha_k, \alpha_\epsilon$ 는 각각 k 와 ϵ 의 inverse effective Prandtl 수, S_k 와 S_ϵ 는 UDF에 의한 소스 항, R_ϵ 는 RNG- ϵ 방정식으로부터 얻은 결과 값, $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ 는 상수이다.

CFD 시뮬레이션 해석은 비정상 상태에 대하여 각각의 환기 시스템이 운영될 경우 실시간 내부 열환경 변화를 모의하고자 하였으며 이를 위하여 적용한 초기 환경 조건은 다음과 같다. 유입되는 외기의 온도는 영하 25℃, 영하 15℃, 영하 5℃의 동절기 세 가지 대표 조건을 설정하여 환경 조건에 따라 선택하였다. 초기 내부 온도 조건은 일령 별 육계 생육 기대 적정 온도를 바탕으로 각각 11일령 시 27.5℃, 25일령 시 22.5℃로 정의하였다.

바닥에서의 닭 발열량은 앞서 제시한 CIGR(1984) 닭 발열량 공식을 위하여 해당 일령에 부합되는 닭 개체의 평균 중량, 내부 온도를 바탕으로 단위 면적당 개체 당 발열량을 환산하여 계산한 값을 사용하였다. 이때 계산된 닭 발열량은 11일령일 때, 단위 면적당 84.47W, 25일령일 때 219.76W이다. 열풍기, 조명 등 기타 열원은 무시하였다. 시뮬레이션에 입력 값으로 사용한 각 경계조건은 다음과 같다(공통).

Table 3.2.3 CFD 시뮬레이션 기본 물성치 및 초기 경계 조건

Parameter		Value	Unit
Density of air		1.225	kg m ⁻³
Viscosity of air		1.86 e-05	kg m ⁻¹ s ⁻¹
Thermal conductivity of air		0.02647	W m ⁻¹ K ⁻¹
Specific heat of air		1006.43	J kg ⁻¹ K ⁻¹
Mass diffusivity of air		2.262 e-05	m ² s ⁻¹
Molecular weight of air		28.966	g mol ⁻¹
Gravitational acceleration of air		9.81	m s ⁻¹
Atmospheric pressure		101.325	kPa
Outside CO ₂ concentration		0.00061(400)	Mass fraction (ppm)
Inside CO ₂ concentration		0.003 (2000)	Mass fraction (ppm)
Heat production of broilers	11days (Ages)	84.47	W
	25days (Ages)	219.76	W
Initial internal air temperature	11days (Ages)	27.5	℃
	25days (Ages)	22.5	℃

다. 계사 환기 시스템에 따른 열효율 평가

HRV 열효율 성능 평가를 위한 시뮬레이션에서는 기존 일반 환기 시스템 및 HRV 적용 시스템의 환기를 연속 운전으로 가정하여(일반 환기 시스템의 배기 팬을 가변식으로 간주하여 일령 별 환경조건에 따라 설계 환기량 적용) 연산을 수행하였다. 설계 환기량에 따라 동일 시간 예를 들어 1분 혹은 2분 동안의 연속 운전을 실시하여 시설 전체 및 계군 내 형성된 열환경을 분석한 후, HRV 시스템 설치에 따른 열적 개선 효과를 판정하고자 하였다.

Table 3.2.4 열효율 산정을 위한 설계 환기량 및 운전 가정 현황

(가) 기존 일반 환기 시스템 대비 HRV 시스템 적용에 따른 내부 환경 평가			
일령	환기시스템 현황	설계 환기량, CMH	운전 방식
11일령	일반 환기 시스템	5,100	연속 운전
	HRV 환기 시스템	9,000	연속 운전
25일령	일반 환기 시스템	13,600	연속 운전
	HRV 환기 시스템	9,000 + 4,600(SED)	연속 운전
(나) 실제 운영 현황을 고려한 일반 환기 및 HRV 시스템 적용에 따른 내부 환경 평가 (참고)			
일령	환기시스템 현황	설계 환기량, CMH	운전 방식
11일령	일반 환기 시스템	30,000	주기 운전*
	HRV 환기 시스템	5,100	연속 운전
25일령	일반 환기 시스템	30,000	주기 운전*
	HRV 환기 시스템	9,000 + 4,600(일반)	연속운전 +주기 운전*

상기 표에서 보는 바와 같이 “기존 일반 환기 시스템 대비 HRV 시스템 적용에 따른 내부 환경 평가 평가” 항목에서는 11일령일 때 일반 환기 시스템의 설계 환기량은 해당 일령의 기대 설계 환기량과 동일한 5,100CMH의 풍량으로 연속 운전 방식이라고 설정하였으며 HRV 환기 시스템의 경우 HRV 시스템 3기가 모두 작동할 때를 기준으로 9,000CMH 풍량으로 연속 운전되는 것으로 설정하였다. 25일령 기준일 경우, 일반 환기 시스템은 해당 일령의 기대 설계 환기량을 기준으로 13,600CMH의 풍량으로 연속운전, HRV 환기 시스템의 경우, 기대 설계 환기량 중 9,000CMH 만큼의 풍량을 HRV 시스템을 통하여 충당하고 잔여 풍량인 4,600CMH를 SED 시스템을 통하여 외기가 주입되는 방식으로 운영된다.

HRV 시스템은 계사 외부로 배출되는 폐열을 회수하여 내부로 유입되는 신선한 외기를 가온한 후 재투입하는 방식으로 운영되며, 이 때 열 효율은 계사 내·외부 온도 차의 약 80% 효율을 바탕으로 외기 가온에 사용된다고 보고된 바 있다. “기존 일반 환기 시스템 대비 HRV 시스템 적용에 따른 내부 환경 평가” 항목 분석의 경우 HRV 시스템 운영 시, 기기 작동에 따른 자체 모터의 가열로 인하여 20℃의 일정한 온도 값을 갖는 외기가 유입된다고 가정하였다. 그러나 이후 “실제 운영 현황을 고려한 일반 환기 및 HRV 시스템 적용에 따른 내부 환경 평가” 분석에 있어서

는 동절기 상황을 고려하여 당초 HRV 시스템의 가온 효율로 보고된 계사 내·외부 온도차의 80% 효율로 외기가 가온 되는 것으로 설정하였다. 이때 계사 내부로 유입 되는 외기의 온도는 다음 식으로 구성된다.

$$T_i - (T_i + T_o) \times 0.8 = T_{duct} \quad \text{식 (3.2.8)}$$

여기서, T_{duct} 는 HRV 시스템을 통하여 가온되어 덕트를 통하여 유입되는 외기의 온도, $^{\circ}\text{C}$, T_i 는 계사 내부 평균 온도, $^{\circ}\text{C}$, T_o 는 계사 외부 평균 온도, $^{\circ}\text{C}$ 이다.

(1) 기존 일반 환기 시스템 대비 HRV 시스템 적용에 따른 내부 환경 평가
(연속운전)

(가) 11일령 기준 열적 효율성 평가

육계사 환경 조건 중 11일령 즉, 초기 내부 온도 27.5°C , 설계 환기량 $5,100\text{CMH}$ (HRV 설치 구조의 경우 $9,000\text{CMH}$)를 기준으로 기존 일반 환기 시스템(배기 팬 5기, 슬롯 입기 구조) 및 HRV 시스템을 적용한 육계사에 대하여 환기가 시작된 후 120초 동안의 열환경 변화를 모의하였다. 계군 내 지역별 열환경 분석을 위하여 다음과 같이 영역을 구분하고 시간에 따른 온도 변화를 모니터링 하였다.

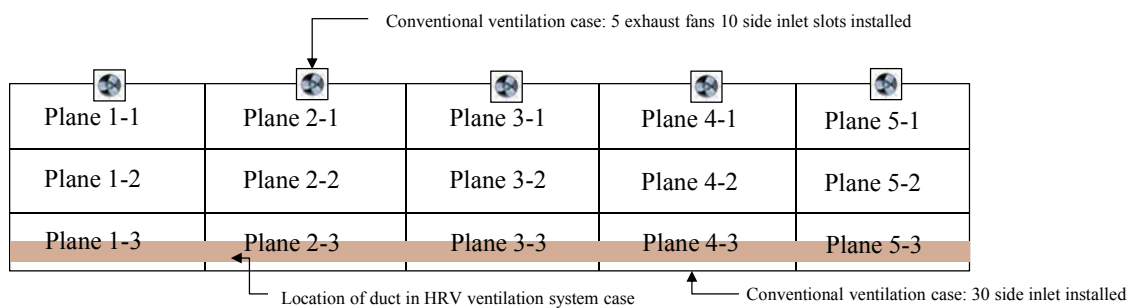


Fig. 3.2.12. 영역별 열환경 분석을 위한 구획 지정 (계군 높이=40cm)

육계 생육 시기 별 기준 중 11일령 시기를 대상으로 해당 시기의 기대 적정 온도 및 기대 설계 환기량을 기준으로 환경 조건 별 CFD 시뮬레이션을 실시하였다. 기존 일반 환기 시스템 구조의 경우 외기 온도를 각각 -5 , -15 , -25°C 를 적용하였고 HRV 환기 시스템 적용 구조의 경우 외기 온도를 -15°C 로 적용하였다. 이때 외부

벽체의 온도는 외기 온도와 동일하다고 가정하였다. 2분 동안 연속 환기를 실시했을 때 계군 높이; 바닥으로부터 40cm 높이에서의 시간대 별, 영역 별 온도 분포 결과는 다음 표와 같다.

Table 3.2.5. 기존 일반 환기 시스템 환기 작동 10초 이후 지역별 온도 분포(℃)

t=10s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
C_m5	26.2	27.5	25.5	26.6	28.0	25.8	26.6	28.0	25.8	26.6	28.0	25.8
C_m15	25.3	27.4	23.9	25.7	28.0	24.3	25.7	28.0	24.3	25.7	28.0	24.3
C_m25	24.2	27.1	22.0	24.7	28.0	22.5	24.7	28.0	22.5	24.7	28.0	22.5
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
C_m5	26.1	27.5	25.5	26.6	28.0	25.5	2.4	0.9				
C_m15	25.0	27.4	23.9	25.8	28.0	23.9	4.1	1.6				
C_m25	23.7	27.1	22.0	24.8	28.0	22.0	6.0	2.3				

*여기서 Diff=Highest-Lowest, STDEV=Standard deviation value, 표준편차

*C_m5는 Conventional ventilation case (minus 5℃)를 의미함

Table 3.2.6. 기존 일반 환기 시스템 환기 작동 30초 이후 지역별 온도 분포(℃)

t=30s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
C_m5	23.7	24.0	22.5	24.1	23.9	22.9	24.1	23.9	22.9	24.1	23.9	23.0
C_m15	22.3	22.0	20.7	22.8	22.0	21.4	22.8	22.0	21.4	22.8	22.0	21.4
C_m25	20.8	19.8	18.9	21.5	20.0	19.8	21.5	20.0	19.7	21.5	20.0	19.8
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
C_m5	23.5	23.8	22.5	23.5	24.1	22.5	1.6	0.6				
C_m15	22.1	21.8	20.7	21.9	22.8	20.7	2.1	0.7				
C_m25	20.6	19.7	18.9	20.2	21.5	18.9	2.6	0.9				

Table 3.2.7. 기존 일반 환기 시스템 환기 작동 60초 이후 지역별 온도 분포(℃)

t=60s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
C_m5	23.1	23.2	22.2	23.8	24.0	23.1	23.9	23.9	23.1	23.8	24.0	23.1
C_m15	20.6	21.0	19.5	21.5	22.1	20.8	21.5	22.1	20.8	21.6	22.1	20.8
C_m25	17.7	18.5	16.2	18.8	19.8	17.8	18.8	19.8	17.9	18.9	19.8	17.9
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
C_m5	23.1	23.1	22.1	23.3	24.0	22.1	1.9	0.6				
C_m15	20.5	20.6	19.4	21.0	22.1	19.4	2.7	0.8				
C_m25	17.3	17.9	16.0	18.2	19.8	16.0	3.8	1.2				

Table 3.2.8. 기존 일반 환기 시스템 환기 작동 120초 이후 지역별 온도 분포(°C)

t=120s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
C_m5	19.9	20.8	19.1	21.8	22.2	20.3	21.6	22.1	20.2	21.5	22.2	20.7
C_m15	16.8	17.3	15.6	18.4	18.8	16.9	18.3	18.7	16.9	18.7	18.9	17.4
C_m25	13.0	13.3	11.1	15.0	14.9	13.0	15.1	15.0	13.4	14.7	15.1	13.3
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
C_m5	20.0	20.6	19.5	20.8	22.2	19.1	3.1	1.0				
C_m15	16.4	17.0	15.4	17.4	18.9	15.4	3.6	1.2				
C_m25	12.6	12.8	11.1	13.6	15.1	11.1	4.1	1.4				

시간 대 별 영역 별 온도 분포에서 알 수 있듯이 외기 유입온도가 낮을수록 평균 온도가 낮아지는 경향을 보였으며 최고 온도와 최저 온도의 편차 역시 증가하는 것을 발견할 수 있었다. 영역 별 균일성을 표준 편차 개념으로 적용할 경우 환기가 시작된 후 시간이 지날수록 균일성이 점차 하락하는 것으로 나타났다. 시간 대 별 온도 분포를 살펴볼 때 외기 조건 -25°C의 경우 초기 10초 시, 온도 편차가 6°C 정도로 가장 크게 나타났으며 이는 환기가 시작 된 후 입기 슬롯으로부터 유입된 외기가 처음 계군 내 도달하면서 발생하는 현상으로 사료되며, 이는 외기 조건이 낮을수록 환기 초기의 열적 균일성 문제 발생 및 열적 스트레스 상황이 도래될 수 있음을 시사한다. 또한 환기가 진행 된 후 120초 후에는 모든 외기 조건에서 20°C 이하의 평균 온도를 보이며 특히 -25°C 외기 조건에서 최저 온도가 11.1°C까지 떨어지는 등 계군 기대 온도 27.5°C에 비하여 상당히 많은 온도 편차를 나타냈으며 이는, 보다 적절하고 짧은 환기 주기의 선택이 요구됨을 의미한다.

외기 조건이 동일한 일반 환기 시스템(외기 온도 -15°C일 때)과 HRV 환기 시스템의 시간에 따른 온도 분포를 비교하면 다음과 같다.

Table 3.2.9. 외기 조건 영하 15°C시, 기존 일반 환기 시스템 및 HRV 환기시스템 작동 30초 이후 지역별 온도 분포(°C)

t=30s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
HRV	22.5	23.2	22.1	23.1	23.6	22.6	23.1	23.7	22.6	23.0	23.6	22.7
C_m15	22.3	22.0	20.7	22.8	22.0	21.4	22.8	22.0	21.4	22.8	22.0	21.4
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
HRV	22.6	23.2	22.1	22.9	23.7	22.1	1.6	0.5				
C_m15	22.1	21.8	20.7	21.9	22.8	20.7	2.1	0.7				

Table 3.2.10. 외기 조건 영하 15℃시, 기존 일반 환기 시스템 및 HRV 환기시스템 작동 60초 이후 지역별 온도 분포(℃)

t=60s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
HRV	22.0	22.7	21.2	23.0	23.6	22.3	22.8	23.6	22.3	22.7	23.5	22.2
C_m15	20.6	21.0	19.5	21.5	22.1	20.8	21.5	22.1	20.8	21.6	22.1	20.8
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
HRV	21.9	22.8	21.2	22.5	23.6	21.2	2.4	0.8				
C_m15	20.5	20.6	19.4	21.0	22.1	19.4	2.7	0.8				

Table 3.2.11 외기 조건 영하 15℃시, 기존 일반 환기 시스템 및 HRV 환기시스템 작동 120초 이후 지역별 온도 분포(℃)

t=120s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
HRV	18.7	19.6	18.2	20.4	20.6	19.2	20.1	20.6	19.2	19.9	20.7	19.0
C_m15	16.8	17.3	15.6	18.4	18.8	16.9	18.3	18.7	16.9	18.7	18.9	17.4
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
HRV	18.5	19.6	18.4	19.5	20.7	18.2	2.5	0.9				
C_m15	16.4	17.0	15.4	17.4	18.9	15.4	3.6	1.2				

시간대 별 영역별 온도 분포를 살펴볼 때 거의 모든 영역에 걸쳐 기존 일반 환기 시스템보다 HRV 환기 시스템을 적용할 때 높은 온도 분포를 보이는 것으로 나타났다. 온도 편차 역시 2.5℃로 일반 환기 구조의 3.6℃보다 우수하게(적은 값을 보이는 것으로) 나타났다. 평균온도(약 2.1℃ 차), 최고 온도(1.8℃ 차), 최저 온도(2.8℃ 차) 면에서 모두 우수한 결과를 나타냈으며 최고-최저 온도 간의 편차 면에서도 상대적으로 적은 값을 보며 열적으로 안정하다고 판단할 수 있었으며, 균일성을 온도 분포(표준 편차)값으로 평가할 때 거의 모든 시간대에 대하여 우수한 값을 보이는 것으로 나타났다. 기존의 일반 환기 시스템의 경우 외기 조건 별, 그리고 HRV 환기 시스템 대비 온도 편차가 크게 나타나는데 이는 기존 일반 환기 시스템에서 입기 슬롯을 통하여 외기가 유입되면서 차가운 외기가 바로 계군 내 떨어지는 현상에 의한 것으로 사료된다. 이는 영역 별 온도 값을 대상으로 n-1 (n=1, 2, 3) 지역의 온도 평균 값과 n-3 지역의 온도 평균 값을 비교할 때 극명하게 나타난다.

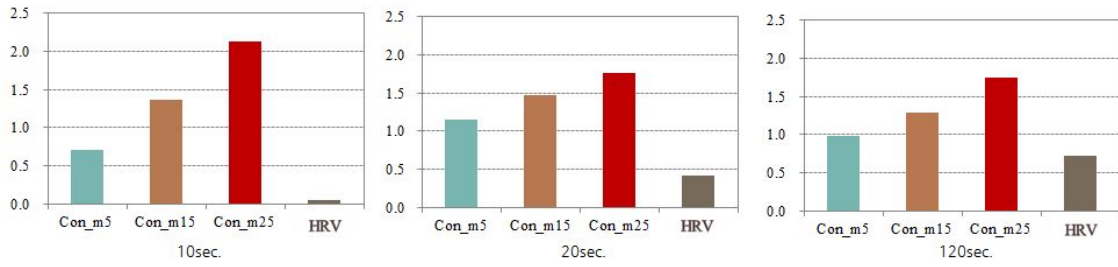


Fig. 3.2.13. n-1 지역 및 n-3 지역 간의 구조별, 외기 조건 별 온도 편차(°C)

상기 그래프에서와 같이, 기존 일반 환기 시스템에서는 유입 외기 조건이 낮아질 수록 길이 방향에 따른 온도 편차가 증가하는 것으로 나타났으며 동일한 외기 조건 (-15°C)을 대상으로 HRV 시스템의 길이 방향 온도 편차와 비교할 때, 환기가 시작된 후 10초 후 약 0.7°C, 20초 후 약 0.8°C, 120초 후 약 0.3°C의 온도 편차를 보이는 것으로 나타났다.

보다 정확한 길이 방향, 폭 방향 온도 구배 분석을 위하여 길이 방향의 경우 다음 그림과 같이 닥 측벽으로부터 0.4m 간격 및 중앙 측을 대상으로 해당 영역에 대한 온도 데이터들을 추출하여 열환경 분석을 실시하였다.

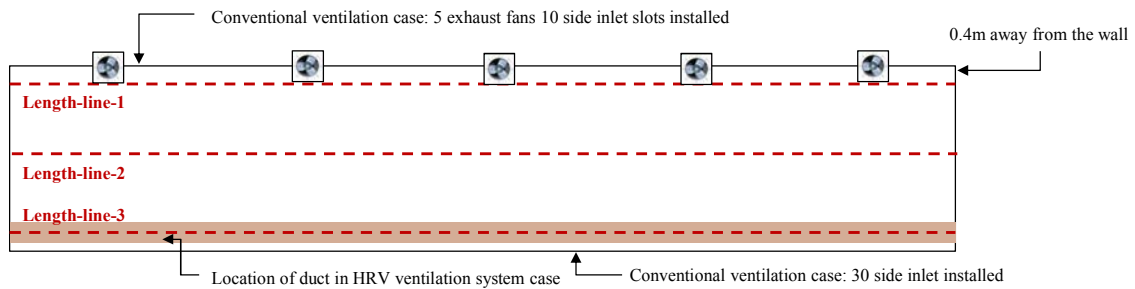


Fig. 3.2.14. 길이 방향 분석을 위한 계군 높이 길이 방향 온도 모니터링 지점

Table 3.2.12. 11일령 기준 계군 높이, 길이 방향 별 온도 모니터링; line-1 영역(°C)

11일령 기준, Length-line-1 온도 데이터 모니터링 값					
t=30s	Highest	Lowest	Diff.	Average	STDEV
Con_m5	23.7	17.4	6.3	22.8	0.9
Con_m15	22.6	14.0	8.6	21.3	1.2
Con_m25	21.8	10.3	11.5	19.9	1.8
Con_m15	22.6	14.0	8.6	21.3	1.2
HRV	22.9	18.8	4.1	22.1	0.6

Table 3.2.13. 11일령 기준 계군 높이, 길이 방향 별 온도 모니터링; line-2 영역(°C)

11일령 기준, Length-line-2 온도 데이터 모니터링 값					
t=30s	Highest	Lowest	Diff.	Average	STDEV
Con_m5	26.5	22.5	4.0	24.0	1.0
Con_m15	24.8	19.7	5.1	21.9	1.3
Con_m25	22.4	17.3	5.1	19.7	1.4
Con_m15	24.8	19.7	5.1	21.9	1.3
HRV	25.4	22.9	2.5	24.4	0.5

Table 3.2.14. 11일령 기준 계군 높이, 길이 방향 별 온도 모니터링; line-3 영역(°C)

11일령 기준, Length-line-2 온도 데이터 모니터링 값					
t=30s	Highest	Lowest	Diff.	Average	STDEV
Con_m5	23.2	17.9	5.3	21.4	1.2
Con_m15	21.9	14.6	7.3	19.5	1.7
Con_m25	20.7	11.4	9.3	17.6	2.3
Con_m15	21.9	14.6	7.3	19.5	1.7
HRV	22.9	18.2	4.7	22.2	0.7

앞선 지역 별 분석과 마찬가지로 길이 방향 별 분석 또한 기존 일반 환기 구조에서 상대적으로 큰 온도 편차 값을 보였으며 표준 편차로 대표되는 균일성 또한 HRV 시스템이 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. 기존 일반 환기 구조의 경우 유입 온도가 영하 25°C일 경우 길이 방향으로 크게는 약 11.5°C 가량의 온도 편차를 보이는 것으로 나타나 균일성에 문제가 있음을 지적하고 있다. 하단 그래프를 통하여 관찰할 수 있듯이 기존 일반 환기 구조에서 길이 방향 별로 온도 편차를 보이는 것을 입기 슬롯의 길이 방향 별 입지 유무에 따른 것으로써 외기가 계군 내에 도달하는 영역, 또는 그렇지 못한 영역에 따라 극심한 온도 편차를 보이는 것으로 사료된다. 이러한 지역별 불균형 적인 온도 편차는 양계 사육 시 열적 스트레스를 야기시키며 계군이 보다 온도가 높은 영역으로 모여들게 됨에 따라 사육 환경 저하 또한 발생시킬 우려가 있다. 반면 HRV 시스템을 적용할 경우 하단 그림과 같이 육계사 출입문 및 반대쪽 측면 인근을 제외한 거의 모든 영역에서 안정적인 온도 분포를 보였으며 동일 외기 조건 일반 환기 구조에 비하여 2.6~4.5°C 가량 낮은 온도 편차 값을 보였으며 표준 편차 값 또한 낮게 나타나 상대적으로 우수한 길이 방향 별 균일성을 보이는 것으로 나타났다.

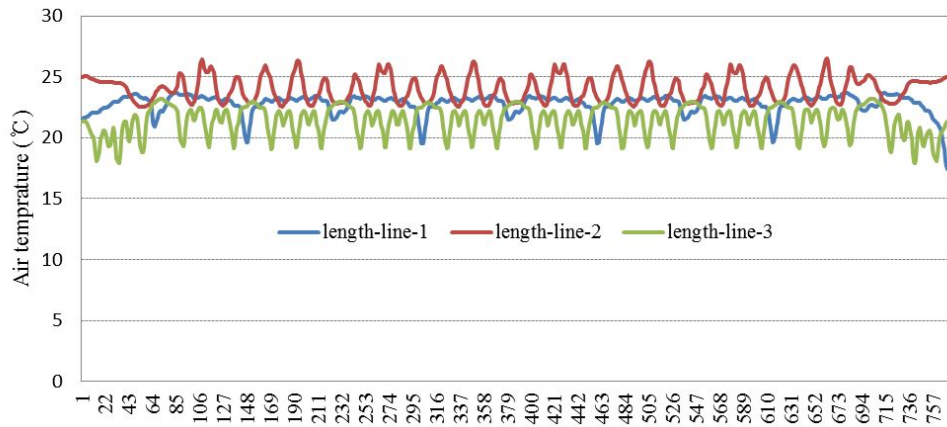


Fig. 3.2.15. 11일령 기준 일반 환기 구조 시스템 (-5°C 외기 유입), 30초 환기 후 길이 방향 별 온도 모니터링

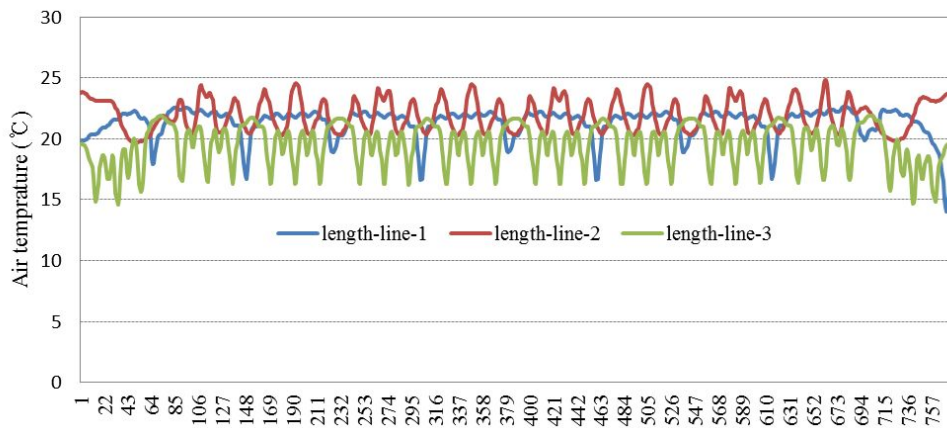


Fig. 3.2.16. 11일령 기준 일반 환기 구조 시스템 (-15°C 외기 유입), 30초 환기 후 길이 방향 별 온도 모니터링

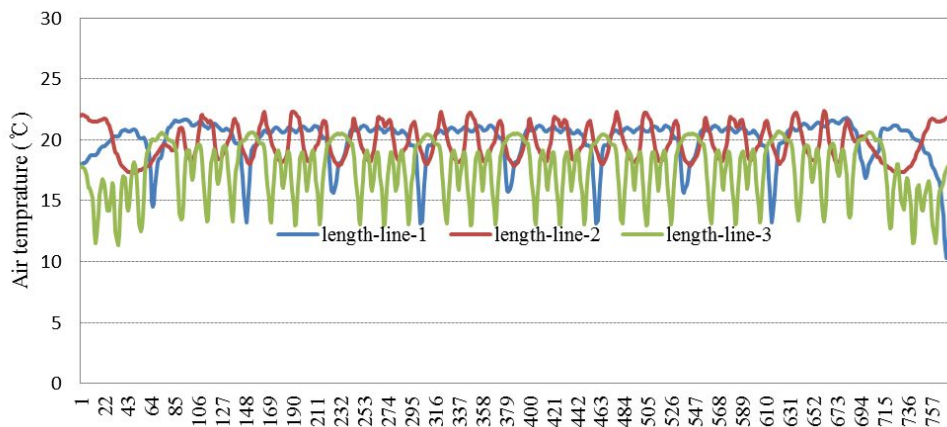


Fig. 3.2.17. 11일령 기준 일반 환기 구조 시스템 (-25°C 외기 유입), 30초 환기 후 길이 방향 별 온도 모니터링

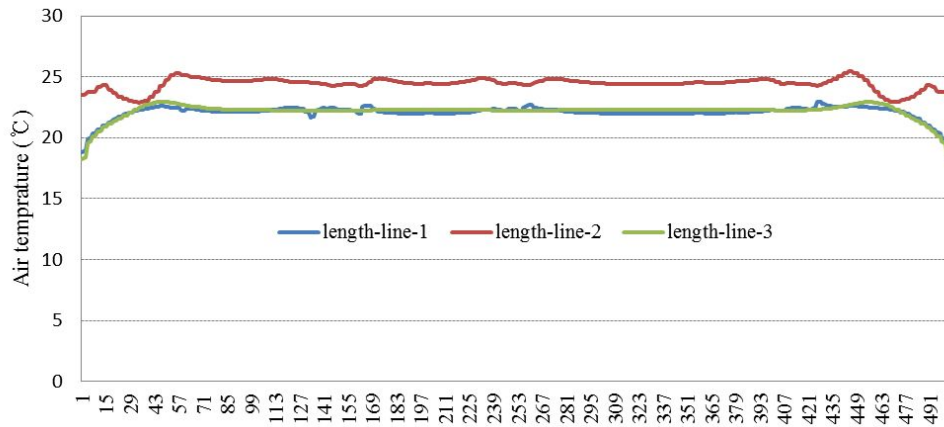


Fig. 3.2.18. 11일령 HRV 환기 시스템 (-25°C 외기 유입),
30초 환기 후 길이 방향 별 온도 모니터링

다음 그림은 동일 외기 조건(-15°C)에 대하여 기존 일반 환기 시스템 및 HRV 설치 시스템의 폭 방향 별 온도 모니터링 결과 중 일부이다. 그림에서 보는 바와 같이 기존 일반 환기 구조의 경우 입기 슬롯으로부터 외기가 유입된 후 낙하 되는 지점에서 발생하는 극심한 온도 편차를 발견할 수 있으며 HRV 시스템의 경우 폭방향으로 상대적으로 균일한 온도 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다.

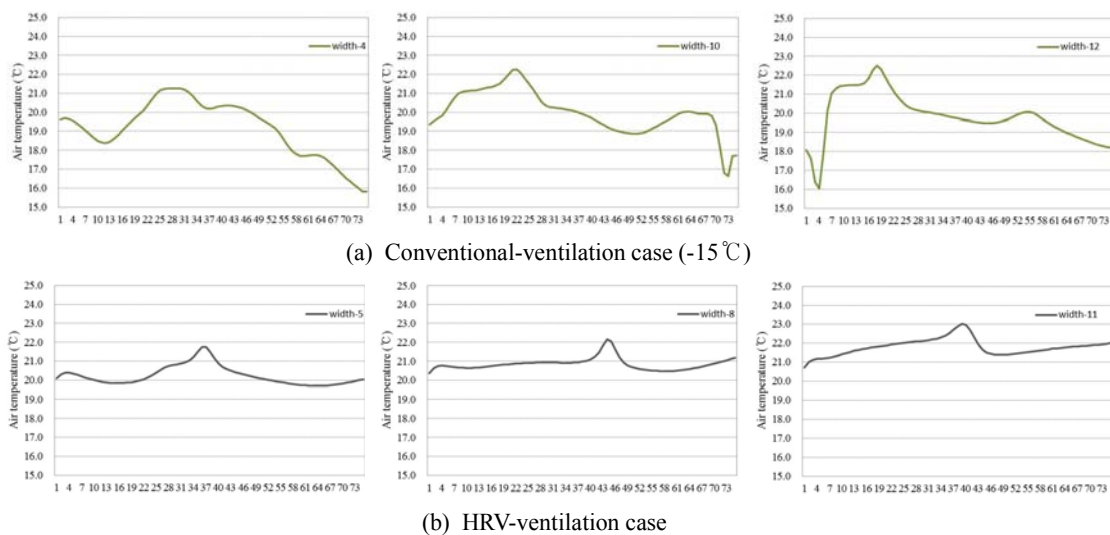


Fig. 3.2.19. 11일령 기존 일반 환기 구조 및 HRV 환기 시스템 폭 방향 형 온도 모니터링

정성적인 열환경 분석을 위하여 외기 유입 온도 별 각 단면의 온도 분포를 보면 다음 그림과 같다. 전면부 온도장은 입기 슬롯을 중심으로 배기 팬 설치된 쪽 측벽 반대편, 배기팬 설치된 측벽, 그리고 배기팬 단면을 나타내며 탑뷰(Top-view)의 경

우 바닥으로부터 40cm 높이의 계군에서의 온도장을 의미한다.

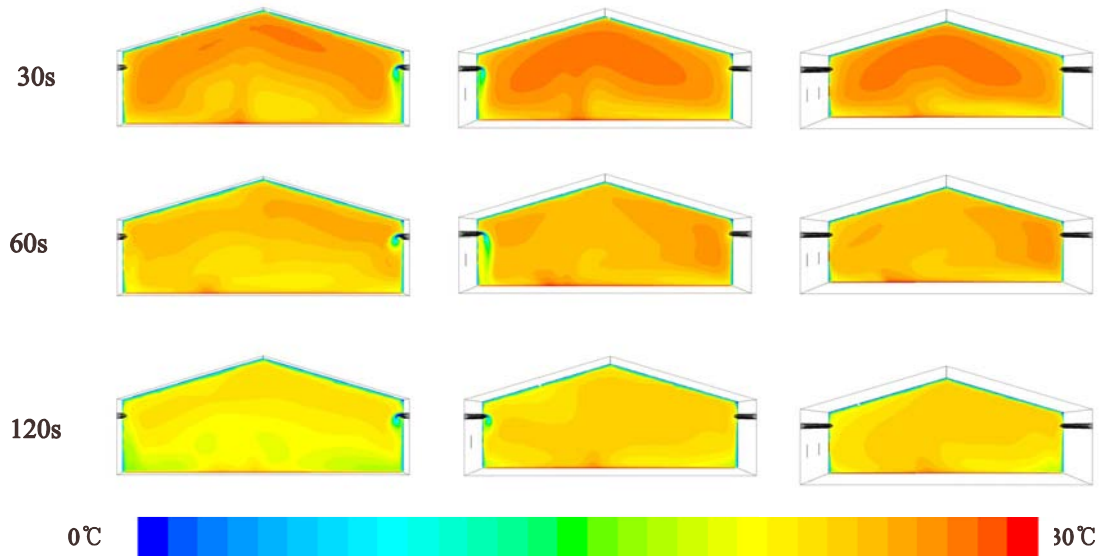


Fig. 3.2.20. 일반 환기 구조 시스템 (외기 조건 -5°C)의 각 단면 별 온도장 분포

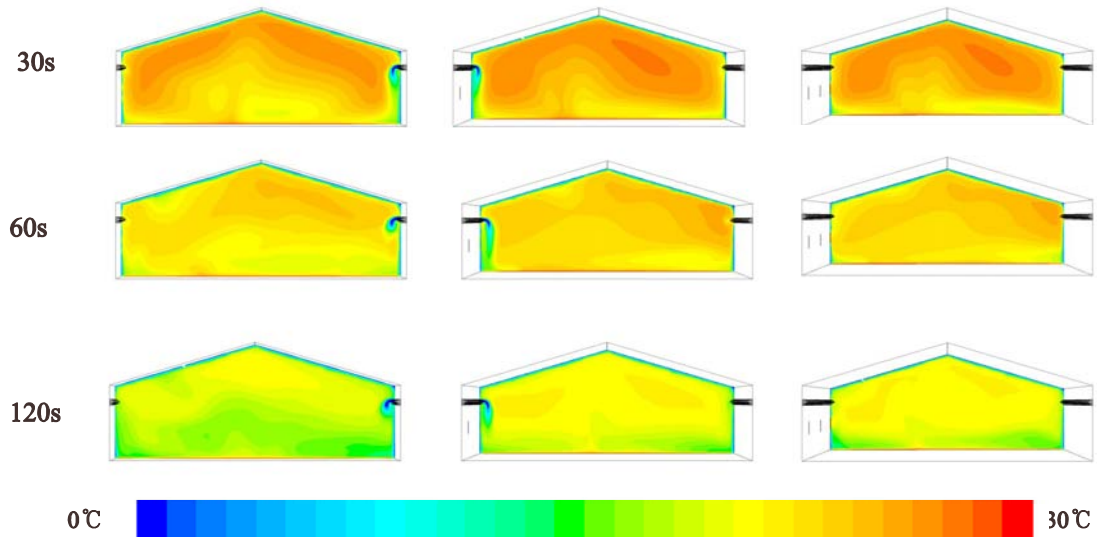


Fig. 3.2.21. 일반 환기 구조 시스템 (외기 조건 -15°C)의 각 단면 별 온도장 분포

일반 환기 구조의 경우 입기 슬롯으로부터 차가운 외기가 거의 벽면에 인접하여 유입되는 것을 관찰할 수 있으며 시간이 흐름에 따라 입기 슬롯으로부터 유입된 차가운 외기류가 바닥을 타고 계군 중앙 부근으로 서서히 밀려 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 유입된 차가운 외기가 계사 상단 부근에 존재하는(환기가 진행됨에 따라 고온의 공기는 자체 부력에 의하여 계사 지붕 아래쪽으로 이동함) 상대적으로

고온의 열에너지와 충분히 혼합하지 못하고 그대로 계군내로 떨어지면서 계군의 열적 스트레스를 야기시킬 수 있을 뿐만 아니라 낮은 온도로 인하여 적정성에 문제를 일으킬 수 있다. 유입되는 외기 온도가 낮을수록 상대적으로 높은 밀도로 인하여 입기된 기류가 바닥으로 깔린 후 중앙 측으로 밀고나가려는 경향이 강하게 나타났다.

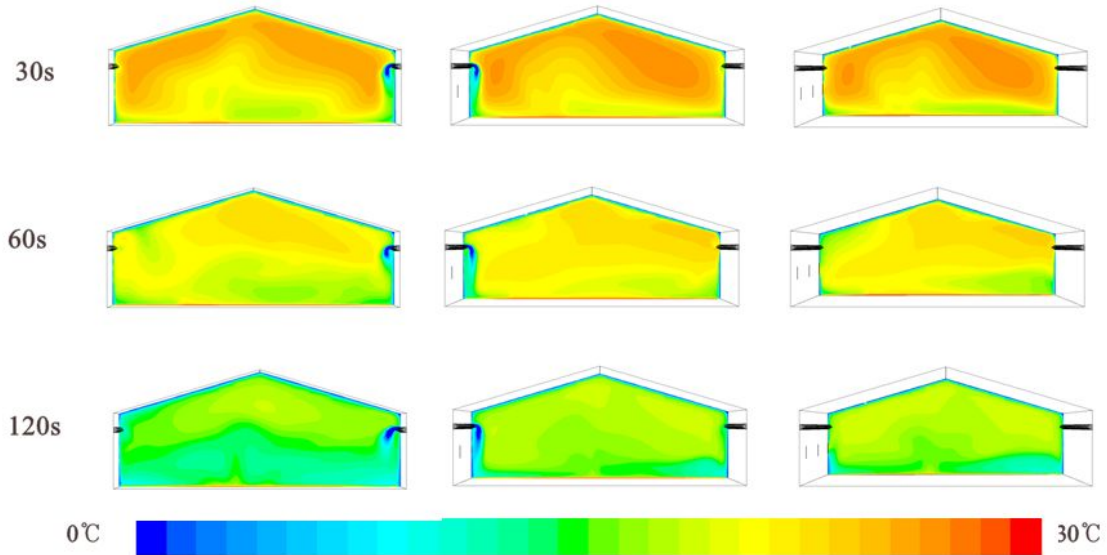


Fig. 3.2.22. 일반 환기 구조 시스템 (외기 조건 -25°C)의 각 단면 별 온도장 분포

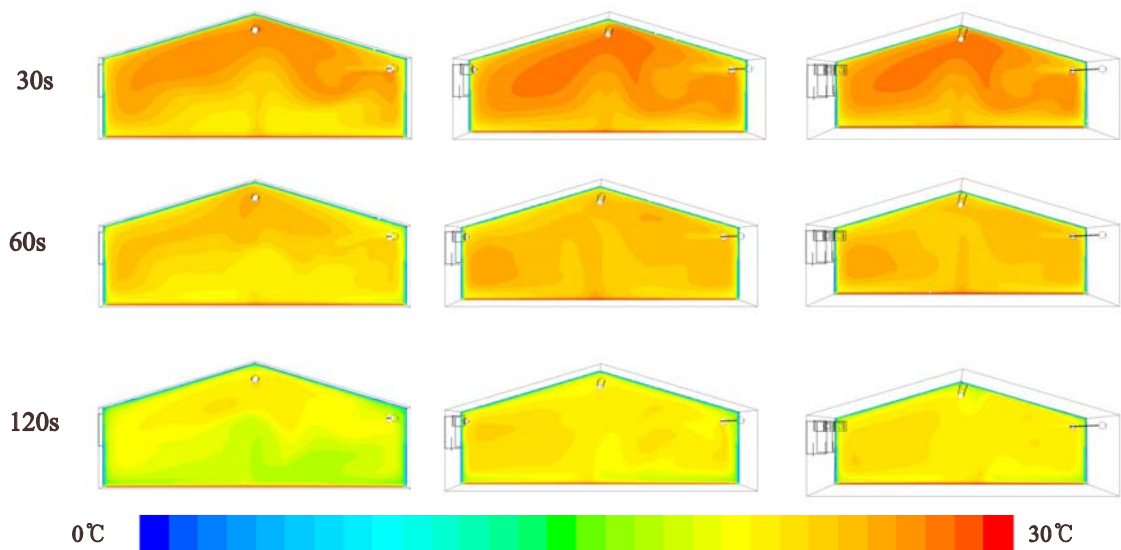


Fig. 3.2.23. HRV 환기 시스템 적용 구조의 단면 별 온도장 분포

반면 HRV 환기 시스템을 설치한 구조의 경우 20°C로 가온된 외기가 우측 덕트를

통하여 공급되고 이때 덕트를 통하여 분배된 기류는 내부 유동에 의하여 지붕 상단 부를 거쳐 반대쪽 측벽을 타고 계군 내로 다시 떨어지는 현상을 보인다. 따라서 이미 가온된 외기의 효과 및 지붕 상단부의 상대적으로 따뜻한 공기층과 혼합된 후 순환하여 계군 내 떨어지므로 차가운 외기가 그대로 계군 내 도달하는 일반 환기 구조에 비하여 우수한 열적 안정성을 보이는 것으로 사료된다.

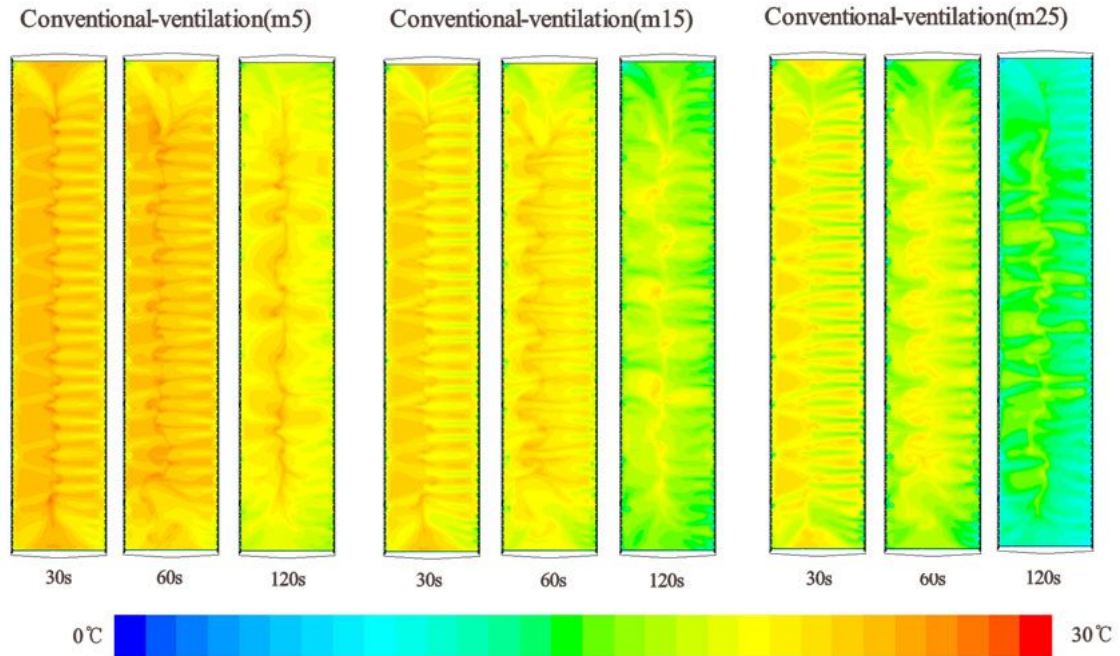


Fig. 3.2.24. 기존 일반 환기 구조의 유입 외기 조건 별 계군 높이 온도장 분포

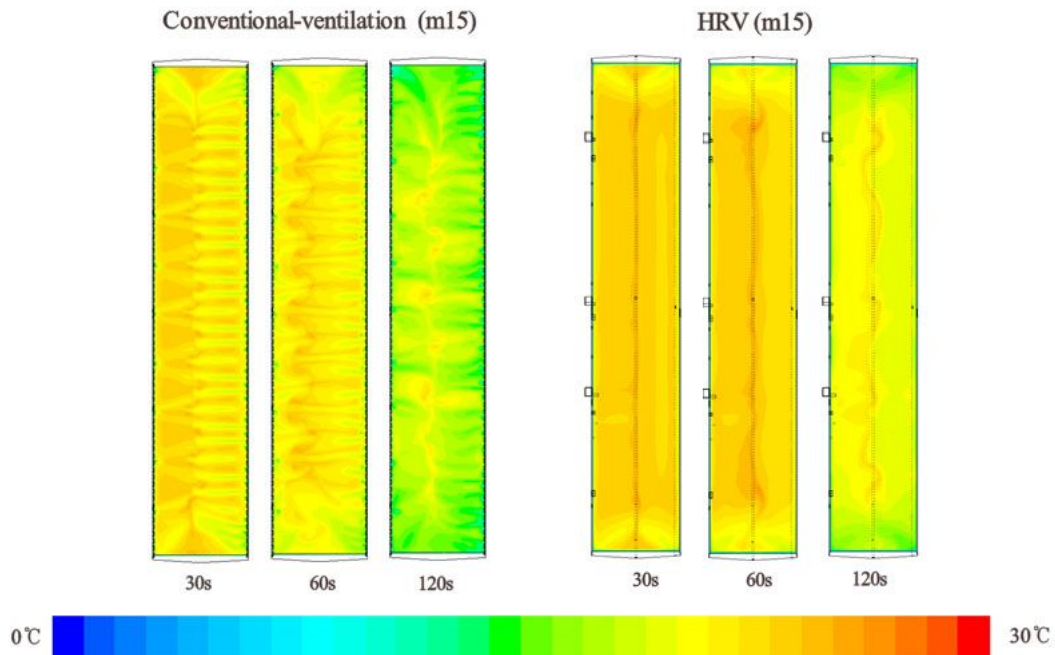


Fig. 3.2.25. 동일 외기 조건 기준 일반 환기 구조 및 HRV 환기 구조 시스템의 계군 높이 온도장 분포

계군 높이 온도장을 살펴볼 경우, 슬롯 유입구가 위치하고 있는 인근에서는 슬롯으로부터 유입된 차가운 외기에 의하여 슬롯 유무에 따라 위치별로 확연한 온도 편차를 보이며 시간이 흐름에 따라 차가운 외기가 계군 중앙부 쪽으로 이동하는 형태를 확인할 수 있다. 반면 HRV 시스템을 적용할 경우 동일 외기 조건, 기존 일반 환기 시스템의 계군 높이 온도장과 비교하였을 때 상대적으로 거의 모든 영역에 대하여 균일한 온도 분포를 보였으며 평균 온도 역시 상대적으로 높게 나타나 열적 균일성 및 적정성이 상대적으로 우수함을 정성적으로 파악할 수 있었다. 단, HRV 적용 시스템의 경우 계사 출입문 및 그 반대 측에서 시간의 흐름에 따라 온도가 점차 하락하는 현상을 보이는데 이는 적절한 환기 주기 산정 및 운영 조건 도출 등을 통하여 해결해야 될 문제로 사료된다.

정량적인 열환경 분석을 위하여 전도 열손실이 발생될 것으로 우려되는 벽체 인근 영역(벽체로부터 20cm)을 제외한 계군 높이(바닥으로부터 40cm)에서의 계산 영역 내 모든 Cell에서의 온도 데이터 값을 추출하여(이때 추출된 온도 값의 개수는 약 55,000개로 해당 높이 해당 단면에서의 격자 개수에 기인함) 열환경 분석을 실시하면 다음과 같다.

Table 3.2.15. 벽체 인근(20cm)을 제외한 계군 높이(40cm)에서 계산 영역 내 모든 셀에서 온도 값 추출 및 그에 대한 열환경 분석 결과

t=30s	Average	STDEV	Highest	Lowest	Diff.	±2°C Ratio	27.5±5°C	27.5±4.5°C
C_m5	23.4	1.3	28.0	16.0	12.0	91.7 %	80.2 %	70.0 %
C_m15	21.7	1.6	25.1	12.5	12.7	88.5 %	39.6 %	23.3 %
C_m25	19.9	1.9	23.0	9.1	13.9	72.2 %	3.5 %	0.0 %
HRV	23.1	0.9	25.9	17.9	8.0	95.5 %	86.9 %	70.3 %
t=60s	Average	STDEV	Highest	Lowest	Diff.	±2°C Ratio	27.5±5°C	27.5±4.5°C
C_m5	23.2	1.3	27.1	16.2	10.9	89.5 %	78.4 %	66.2 %
C_m15	20.9	1.6	25.1	12.2	12.8	82.9 %	13.1 %	7.2 %
C_m25	18.1	2.0	22.7	6.8	15.9	70.7 %	0.0 %	0.0 %
HRV	22.8	1.2	26.3	17.2	9.1	89.7 %	77.4 %	48.7 %

*여기서 Diff=Highest-Lowest, STDEV=Standard deviation value, 표준편차

*C_m5는 Conventional ventilation case (minus 5°C)를 의미함

*±2°C Ratio는 해당 시간에서의 전체 온도 데이터 중 평균 온도±2°C 비율

상기 표에 나타나듯이 기존 일반 환기 시스템 적용 구조의 경우 외기 유입 온도가 낮아질수록 평균온도는 하락하고 최고-최저 온도의 온도 편차 또한 증가하는 것으로 나타났다. 환기가 시작된 30초 후 발생한 최고-최저 온도의 온도 편차 값의 경우 유입온도 -25°C구조에서 최대 13.9°C의 차이를 보였으며 60초 이후에는 15.9°C의 차이를 보여 균일성에 문제가 있을 것으로 짐작할 수 있었다. 해당 시각에서의 평균 온도 값을 기준으로 2°C의 내외의 온도 값을 갖는 비율을 ‘균일성’을 평가하는 한 지표로써 가정할 때, 일반 환기 시스템 구조의 경우, 30초 시, 외기 온도 -5°C 대비 외기 유입 온도 조건에 따라 균일성 약 13~20% 하락하는 것으로 나타났으며 60초 시, 약 7~20% 가량의 균일성 지수가 하락하는 것을 확인할 수 있었다. HRV 환기 시스템을 적용할 경우, 동일 외기 조건에 대하여 30초 시, 7%, 60초 시, 6.8% 정도의 균일성 향상 효과를 보이는 것으로 나타났다. 또한 최고-최저 온도의 편차 역시 약 4°C 가량 작은 값을 보여, 일반 환기 시스템 대비 계군 온도 높이에서 보다 균일하고 안정적인 열적 효과를 누리고 있음을 확인할 수 있었다.

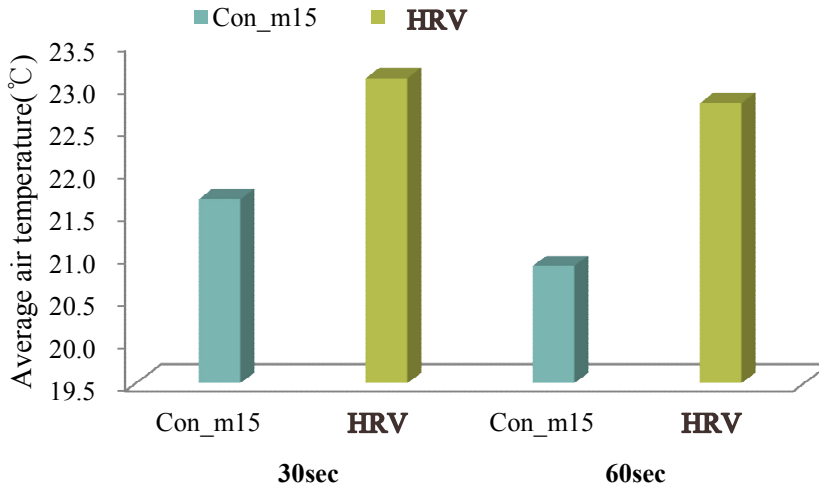


Fig. 3.2.26. 외기 온도 조건 -15°C 일 때, 30초, 60초 후 계군 높이에서의 평균 온도

11일령 기준 육계 사육 기대 적정 온도인 27.5°C 를 중심으로 계군 내 온도 분포의 '적정성' 정도를 파악하기 위하여 계산 영역 내 모든 Cell에서 추출한 온도 데이터들을 바탕으로 $27.5\pm 5^{\circ}\text{C}$, $27.5\pm 4.5^{\circ}\text{C}$ 범주 안에 속하는 데이터들의 비율을 산정해 볼 때, 30초 이후, 기존 일반 환기 구조에서는 유입되는 외기 온도가 감소함에 따라 각각 80.2, 39.6, 3.5%로 극명하게 감소하는 것을 보였다. 이는 외기 온도가 -15 , -25°C 조건일 때 계군 내 온도 분포 대부분이 기대 적정 온도 범주 이하로 떨어지므로 안정적인 육계 생산 조건을 충족시키지 못하는 것으로 나타나 호흡기성 질병 혹은 성장률의 극심한 감소를 야기시킬 것이라 예상할 수 있다. $27.5\pm 4.5^{\circ}\text{C}$ 일 때 도 앞선 결과와 마찬가지로 각각 70.0, 23.3, 0.0%로써 육계 사육 적정성을 불만족 시키는 것으로 나타났다. HRV 시스템을 적용할 경우, 동일 외기 조건에 대한 일반 환기 구조 결과 대비 $27.5\pm 5^{\circ}\text{C}$, $27.5\pm 4.5^{\circ}\text{C}$ 기준 30초 기준 각각 86.9%, 70.3%로써 47.3%, 47% 가량 적정성 지수가 더 우수한 것으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 계사 외부 영하의 차가운 외기가 그대로 유입되는 일반 환기 구조에 비하여 20°C 로 가온되어 공급되는 HRV 시스템의 성능을 극명하게 드러내주는 결과라고 할 수 있다. 환기가 시작된 지 60초 후의 경우, 기존 일반 환기 시스템의 적정성 비율이 13.1%($27.5\pm 5^{\circ}\text{C}$), 7.2%($27.5\pm 4.5^{\circ}\text{C}$),=인데 반하여 HRV 환기 시스템 적용 구조의 경우 각각 77.4%, 48.7%로써 32~64% 가량 향상되는 효과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 그러다 60초 이후, $27.5\pm 4.5^{\circ}\text{C}$ 온도 범주의 비율이 48.7%로 나타나는 것으로 보아 적정 온도 범위 이하에 적용되는 영역이 절반 가량 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 설계 환기량 차이 및, 환기가 연속적으로 작동되어 나타나는 결과로 판별할 수 있으며 향후 운전 주기 산정 혹은 연속 운전 시간 범위 명시

를 통하여 해결해야 될 부분이라 사료된다. 외기 조건 영하 15℃를 기준으로 30초 및 60초 시각에서의 기존 일반 환기 구조 계군 높이 평균 온도 및 HRV 시스템 적용 구조 계군 높이 평균 온도를 토대로 온도 값의 차이를 이용하여 동일 열에너지를 갖기 위하여 기존 일반 환기 구조에 투입해야 되는 열량을 계산해보면 각각 1371.8kcal, 2040.0kcal로 나타났다. 이는 HRV 시스템이 해당 시각에서 상기 값 들 만큼의 에너지 절약 효과를 누리고 있다고(혹은 기존 일반 환기 시스템에서 해당 열량만큼의 에너지를 열풍기 등의 기타 보온 시설을 통하여 공급해줘야 된다고) 산정할 수 있다. 이 때 열량 산출을 위하여 사용한 공식은 다음과 같다.

$$Q = C_p \times \rho \times V \times \Delta T \quad \text{식 (3.2.9)}$$

여기서, C_p 는 공기의 정압 비열($=0.24kcal \cdot kg^{-1}\cdot^{\circ}C^{-1}$), Q 는 동일 열량 값에 도달하기 위하여 추가적으로 투입하여야 할 열량, $kcal$, V 는 시설 내부 체적, m^3 , ΔT 는 온도 차, $^{\circ}C$, ρ 는 공기 밀도($=1.2kgm^{-3}$)이다.

현 연구 단계에서의 11일령 기준 설계 환기량의 경우 기대 설계 환기량 5,100CMH 기준 일반 환기 구조 시스템 5,100CMH HRV 시스템 9,000CMH이다. 여기서 HRV 시스템의 설계 환기량을 5,100CMH로 가정할 경우, 그리고 기존 일반 환기 시스템의 환기량을 HRV 시스템과 동일하게 환산할 때 계군 높이 평균 온도 및 이에 따른 열량 산출 결과는 다음과 같다.

Table 3.2.16 시간 대 별 계군 평균 온도 (℃) 및 동일 열에너지를 갖기 위한 열량 투입량 (kcal)

※ 11일령 기준, 일반 환기 시스템 (5,100CMH), HRV 시스템 (9,000CMH) 적용				
	C_m15	HRV	Diff.	Q
t=30s	21.9	22.9	1.0	1371.8
t=60s	21.0	22.5	1.5	2040.0
※ 11일령 기준, 일반 환기 시스템 (5,100CMH), HRV 시스템 (5,100CMH) 적용				
	C_m15	HRV	Diff.	Q
t=30s	21.9	22.9	1.0	1325.4
t=60s	21.0	22.9	1.9	2485.2
※ 11일령 기준, 일반 환기 시스템 (9,000CMH), HRV 시스템 (9,000CMH) 적용				
	C_m15	HRV	Diff.	Q
t=30s	21.3	22.9	1.6	2087.4
t=60s	19.9	22.5	2.6	3365.8

(나) 25일령 기준 열적 효율성 평가

육계 생육 시기 별 기준 중 25일령을 기준으로 해당 시기의 기대 적정 온도 및 기대 설계 환기량을 기준으로 환경 조건 별 CFD 시뮬레이션을 실시하였다. 기존 일반 환기 시스템 구조의 경우 외기 온도를 각각 -5, -15, -25℃를 적용하였고 이때의 설계 환기량은 13,600CMH이다. HRV 환기 시스템의 경우 총 13,600CMH 풍량 중 9,000CMH를 HRV 시스템을 통하여 충당하고 잔여 풍량을 SED 시스템을 통하여 충당하는 것으로 설계하였다. SED 시스템의 경우 평소에는 내부 온도 균일성 향상을 목적으로 내부 순환용으로 활용되며, 필요 환기 용량이 증가할 경우 가변식으로 외기를 유입하여 중앙 덕트를 통하여 분배하는 역할을 한다. 바닥에서의 답발열량을 CIGR(1984)에서 제시한 25일령 기준 공기 온도 및 평균 중량을 토대로 산출한 값을 활용하였으며 외부 벽체의 온도는 외기 온도와 동일하다고 가정하였다. 2분 동안 연속 환기를 실시하였을 때 계군 높이; 바닥으로부터 40cm 높이에서의 시간대 별, 영역 별 온도 분포 중 대표적으로 30초 및 120초대의 온도 값은 다음과 같다.

Table 3.2.17 일반 환기 및 HRV 환기 시스템(외기 -5℃) 작동 30초 이후 지역별 온도 분포(℃)

t=30s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
C_m5	19.7	20.7	18.0	19.9	20.7	18.3	19.9	20.7	18.3	19.9	20.7	18.3
HRV	20.0	22.6	20.3	20.5	23.7	20.6	20.4	23.6	20.6	20.3	23.3	20.7
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
C_m5	19.4	20.6	18.0	19.5	20.7	18.0	2.7	1.1				
HRV	20.1	22.8	20.2	21.3	23.7	20.0	3.7	1.4				

Table 3.2.18 일반 환기 및 HRV 환기 시스템(외기 -5℃) 작동 120초 이후 지역별 온도 분포(℃)

t=120s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
C_m5	19.0	18.7	16.5	19.1	19.6	17.4	20.3	19.2	17.3	19.6	19.9	17.6
HRV	19.5	21.1	21.5	21.6	21.4	19.2	20.7	22.0	19.4	20.0	21.8	20.6
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
C_m5	18.5	18.4	16.2	18.5	20.3	16.2	4.2	1.2				
HRV	19.9	21.7	20.7	20.7	22.0	19.2	2.8	0.9				

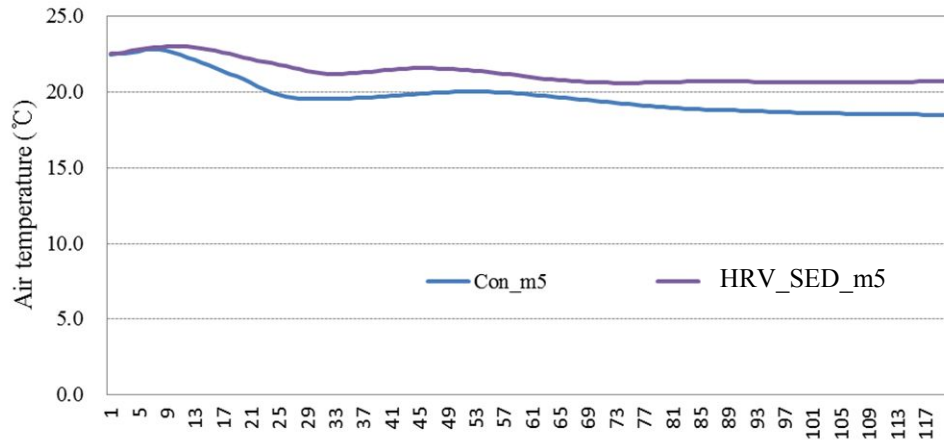


Fig. 3.2.27. 외기 조건 -5℃일 경우 일반 환기 및 HRV 환기 시스템 별 시간에 따른 계군 평균 온도 추이

-5℃의 외기 조건을 설정할 경우 HRV 시스템에서는 SED 시스템을 통하여 동일 온도의 외기가 SED 팬을 통하여 중앙 덕트로 분배되어 시설 내부로 공급되며 HRV 시스템을 통하여 20℃로 가온된 공기가 지붕 우측 하단 덕트를 통하여 공급된다. 환기 시스템의 작동이 시작된 지 30초 및 120초 후의 온도 분포를 살펴보면 30초의 경우 기존 일반 환기 시스템 적용 시, 계군 내 평균 온도는 약 1.8℃정도 하락하나 온도 편차 면에서는 1℃ 정도 작은 값을 보였으며 영역 별 온도 값에 대한 표준 편차 또한 낮은 값을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 환기가 진행된 후 시간이 지날수록 기존 일반 환기 구조에서 온도 편차 값이 점차 증가하여 약 1.4℃ 정도 큰 편차를 보였으며 평균 온도 역시 2.2℃가량 떨어지는 결과를 보였으며 HRV 시스템에서 보다 좋은 균일성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한 시간대 별 계군 평균 온도 그래프를 통하여 확인할 수 있듯이 기존 일반 환기 구조에서는 환기가 시작된 후 30초 동안 온도가 하락하는 경사가 급하게 형성되는 것을 확인할 수 있으며 이를 통하여 30초 동안 환기를 진행할 경우 차가운 외기가 도달되는 영역 내 존재하는 계군 내 열적 스트레스가 발생할 수 있음을 짐작할 수 있다.

Table 3.2.19. 일반 환기 및 HRV 환기 시스템(외기 -15℃) 작동 30초 이후 지역별 온도 분포(℃)

t=30s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
C_m15	18.3	18.5	16.1	18.5	18.7	16.6	18.5	18.7	16.6	18.5	18.7	16.6
HRV	18.9	20.8	19.1	19.4	21.5	19.6	19.4	21.4	19.7	19.3	21.3	19.7
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
C_m15	17.8	18.4	16.1	17.8	18.7	16.1	2.6	1.0				
HRV	19.0	20.9	19.1	19.9	21.5	18.9	2.6	1.0				

Table 3.2.20. 일반 환기 및 HRV 환기 시스템(외기 -15℃) 작동 120초 이후 지역별 온도 분포(℃)

t=120s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
C_m15	14.4	14.8	12.7	15.8	16.0	13.9	16.8	15.8	13.7	16.2	16.3	14.0
HRV	16.7	18.1	18.9	18.4	19.7	17.6	17.4	19.3	18.0	17.2	18.8	19.2
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
C_m15	13.4	14.7	12.4	14.7	16.8	12.4	4.4	1.4				
HRV	16.8	18.2	18.9	18.2	19.7	16.7	2.9	0.9				

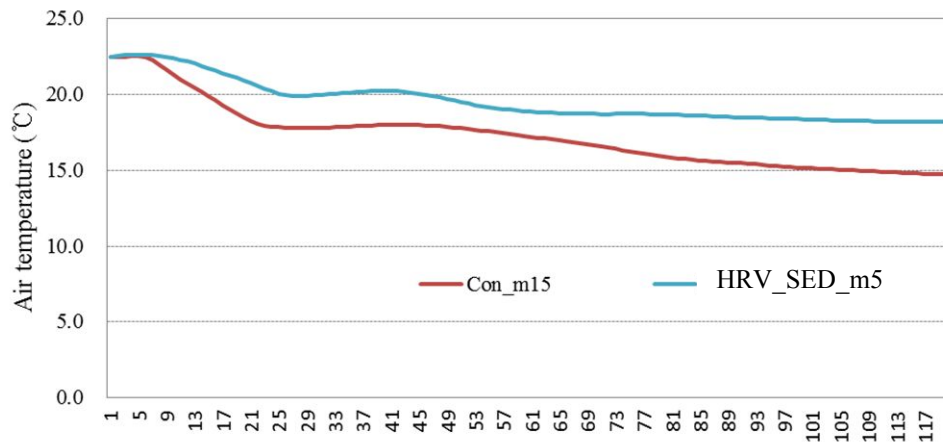


Fig. 3.2.28. 외기 조건 -15℃일 경우 일반 환기 및 HRV 환기 시스템 별 시간에 따른 계군 평균 온도 추이

-15℃의 외기 조건을 설정할 경우, 환기 시스템의 작동이 시작된 지 30초 및 120초 후의 온도 분포를 살펴보면 30초의 경우 기존 일반 환기 시스템 적용 시, 계군 내 평균 온도는 약 2.1℃정도 하락하는 것으로 나타났으며 영역 별 최저 온도는 약 16.1℃까지 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. HRV 시스템의 경우 환기 작동 120초 후에는 기존 일반 환기 구조 대비 평균 온도가 약 18.2℃정도(일반 환기 구조 약 14.7℃) 약 3.5℃ 높은 평균 온도 분포를 보였으며 온도 편차, 표준 편차를 통하여 평가하는 균일성 또한 우수한 것으로 나타났다. 기존 일반 환기 구조의 경우 최저 온도가 약 12.4℃로써 기대 적정 온도보다 약 10℃가량 떨어지는 구간이 발생하여 짧은 환기 주기 적용 등, 온도 적정성을 위한 대책 방안 등이 필요할 것으로 판단된다. 또한 상기 그래프를 통하여 확인할 수 있듯이 환기가 진행 되는 초기 25초 동안 온도가 급격하게 하락하는 것을 확인할 수 있는데 앞서 언급했듯이 입기 슬롯 으로부터 유입되는 외기가 계군에 바로 도달하는 영역에서, 급격한 온도 하락 현상 으로 인하여 호흡기성 질병 유발 및 계군 내 열적 스트레스를 유발할 수 있는 위험 성이 존재할 수 있음을 의미한다.

Table 3.2.21. 일반 환기 및 HRV 환기 시스템(외기 -25℃) 작동 30초 이후 지역별 온도 분포(℃)

t=30s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
C_m25	16.8	16.3	14.1	17.1	16.6	14.9	17.1	16.6	14.8	17.1	16.6	14.9
HRV	17.9	19.5	17.9	18.5	20.3	18.5	18.5	20.3	18.5	18.4	20.2	18.6
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
C_m5	16.2	16.3	14.2	16.0	17.1	14.1	3.0	1.1				
HRV	18.0	19.6	17.8	18.8	20.3	17.8	2.4	0.9				

Table 3.2.22. 일반 환기 및 HRV 환기 시스템(외기 -25℃) 작동 120초 이후 지역별 온도 분포(℃)

t=120s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
C_m25	9.9	11.5	8.8	11.9	12.8	9.9	12.4	12.2	9.4	11.9	12.2	9.8
HRV	13.5	15.5	15.7	15.5	16.8	17.0	14.8	16.6	16.9	14.7	16.6	17.8
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
C_m5	9.0	10.1	7.9	10.7	12.8	7.9	5.0	1.6				
HRV	13.9	15.8	15.2	15.7	17.8	13.5	4.3	1.2				

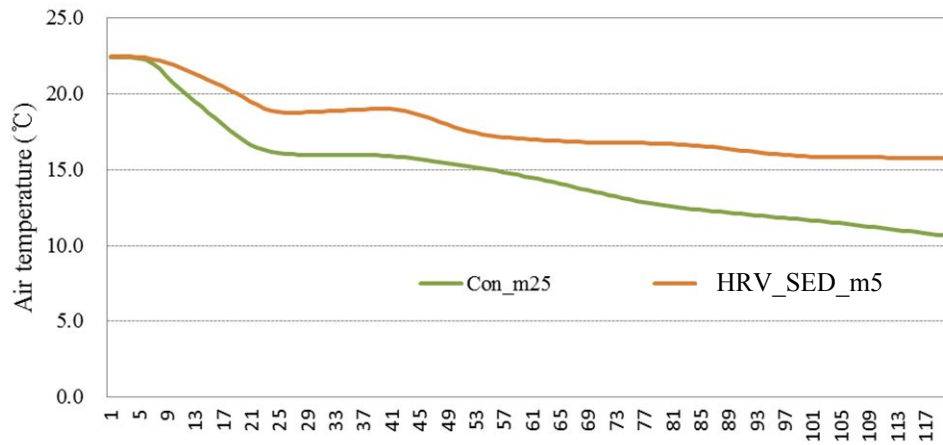


Fig. 3.2.29. 외기 조건 -25℃일 경우 일반 환기 및 HRV 환기 시스템 별 시간에 따른 계군 평균 온도 추이

-25℃의 외기가 유입될 경우 일반 환기 구조 대비 HRV 환기 시스템에서의 계군 평균 온도는 환기 시작 120초 후 무려 약 5.0℃ 가량 차이를 보였으며 일반 환기 구조의 영역 별 최저 온도는 7.9℃까지 떨어지는 것으로 나타났으며 균일성 또한 하락하는 결과를 보였다. -25℃ 외기 조건일 경우 환기 동작 30초 후, HRV 시스템에서는 계군 평균 온도가 18.8℃정도로 나타나는 것에 비하여 기존 일반 환기 구조에서는 22.5℃ 초기 온도 대비 무려 6.5℃ 가량 하락하는 것으로 나타나 향후 적정

성 및 균일성을 고려한 주기 산정 시 30초 이하의 주기 선정이 필요할 것이라 짐작될 수 있다. 또한 환기가 시작 된 후 약 20초 동안 일반 환기 구조에서 급격한 온도 하락 현상을 보였으며 이 또한 호흡기성 질병의 유발 및 열적 스트레스를 발생될 수 있는 원인이라고 사료된다.

11일령 기준 환기량 조건과 마찬가지로 25일령 환기량을 적용한 일반 환기 구조에서도 길이 방향별 온도 편차가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 팬이 설치된 측벽 측 길이 방향 영역 보다 팬이 설치되지 않은 반대 쪽 측벽 측 입기 슬롯이 30개 개방되어 있는 측벽 인근에서 온도가 상대적으로 낮게 나타나는 분포를 보였으며 각각 2~3℃의 편차를 보이는 것으로 나타났다. 반면 HRV 환기 시스템 적용 시에는 길이 방향 별 온도 편차는 거의 존재하지 않는 것으로 나타났다.

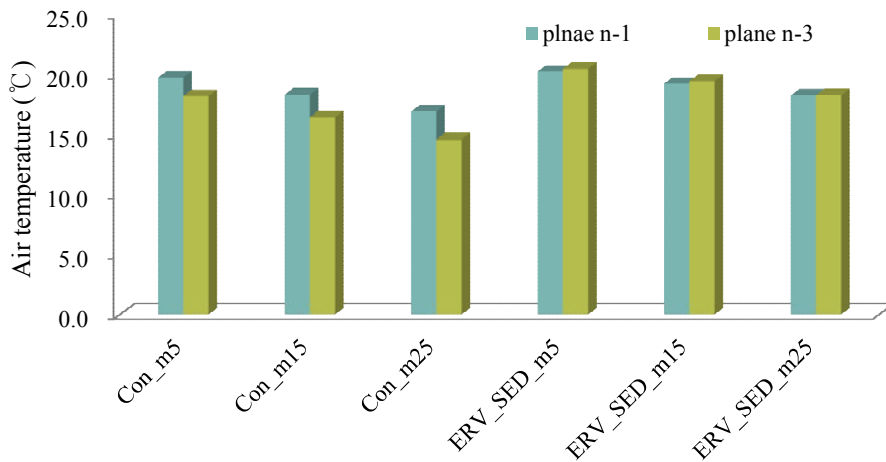


Fig. 3.2.30. 지역 별 모니터링; 길이 방향 별 온도 편차(일반 환기 구조 시, plane n-1: 배기 팬 5기, 입기 슬롯 10구 개방, plane n-3: 입기 슬롯 30개 개방)

Table 3.2.23. 25일령 기준 계군 높이, 길이 방향 별 온도 모니터링; line-1 영역(°C)

25일령 기준, Length-line-1 온도 데이터 모니터링 값					
t=30s	Highest	Lowest	Diff.	Average	STDEV
Con_m5	19.8	13.7	6.1	18.4	1.2
HRV_m5	20.1	16.9	3.2	19.5	0.5
Con_m15	18.6	10.2	8.4	16.8	1.7
HRV_m15	19.4	15.3	4.0	18.7	0.6
Con_m25	17.6	7.3	10.3	15.3	2.3
HRV_m25	18.9	13.8	5.1	18.0	0.8

Table 3.2.24. 25일령 기준 계군 높이, 길이 방향 별 온도 모니터링; line-2 영역(°C)

25일령 기준, Length-line-2 온도 데이터 모니터링 값					
t=30s	Highest	Lowest	Diff.	Average	STDEV
Con_m5	25.4	19.2	6.2	21.2	1.3
HRV_m5	28.8	18.6	10.3	25.4	2.4
Con_m15	23.7	16.1	7.6	19.0	1.6
HRV_m15	25.3	16.6	8.7	22.4	1.6
Con_m25	21.7	13.6	8.1	16.7	1.8
HRV_m25	23.3	14.4	8.9	20.8	1.3

Table 3.2.25 25일령 기준 계군 높이, 길이 방향 별 온도 모니터링; line-3 영역(°C)

25일령 기준, Length-line-3 온도 데이터 모니터링 값					
t=30s	Highest	Lowest	Diff.	Average	STDEV
Con_m5	18.5	15.0	3.5	17.1	0.8
HRV_m5	20.8	16.9	3.9	20.1	0.6
Con_m15	17.2	12.2	4.9	15.1	1.3
HRV_m15	19.8	15.2	4.7	19.1	0.7
Con_m25	16.0	9.3	6.7	13.2	1.7
HRV_m25	18.8	13.4	5.4	17.9	0.8

지역 별 분석과 마찬가지로 길이 방향 별 온도 분포 모니터링 결과 역시 일반 환기 구조에서 상대적으로 큰 온도 편차 값을 보이는 것으로 나타났으며 전체적으로 HRV 시스템을 적용할 경우 균일성 측면에서 우수한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 외기 온도가 -25°C인 경우 일반 환기 구조에서는 최저 7.3°C 까지 온도가 하락하는 지역이 발생했으며 그 때 최고 온도 및 최저 온도 간의 편차는 무려 10°C 가량 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 11일령 환경 조건에 따른 각 구조 별 결과와 마찬가지로 일반 환기 구조에서는 전체적으로 입기 슬롯의 길이 방향 별 입지 유무에 따라 극심한 온도차를 보이는 것을 확인할 수 있었으며 현재 음성 육계사 구조에 대하여 설치된 입기 슬롯의 경우 대부분의 입기류가 계군으로 그대로 떨어지는 것으로 나타나 온도 적정성에 큰 문제가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 길이 방향 별, 온도 모니터링 값을 그래프로 도시 한 결과를 통해서도 정성적으로 확인할 수 있으며 외기 조건이 낮아질수록 길이 방향 별 온도 편차 문제는 더욱 극심하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반면 HRV 시스템을 적용 할 경우, 계군 중앙부에서 측면 부에 비하여 상대적으로 높은 온도 분포를 보이는 것을 확인할 수 있는데 이는 계사 내부에 형성되는 유동장으로 인하여 각각의 덕트를 통하여 분기된

입기류가 계사 측벽을 돌아 가운데 영역으로 밀려 들어오는 형태로 유동장이 형성 되기 때문에 사료된다.

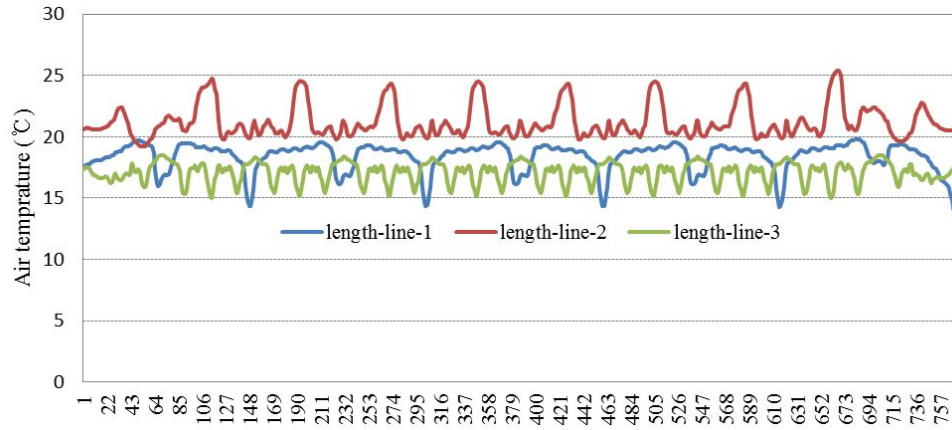


Fig. 3.2.31. 25일령 기준 일반 환기 구조 시스템 (- 5°C 외기 유입),
30초 환기 후 길이 방향 별 온도 모니터링

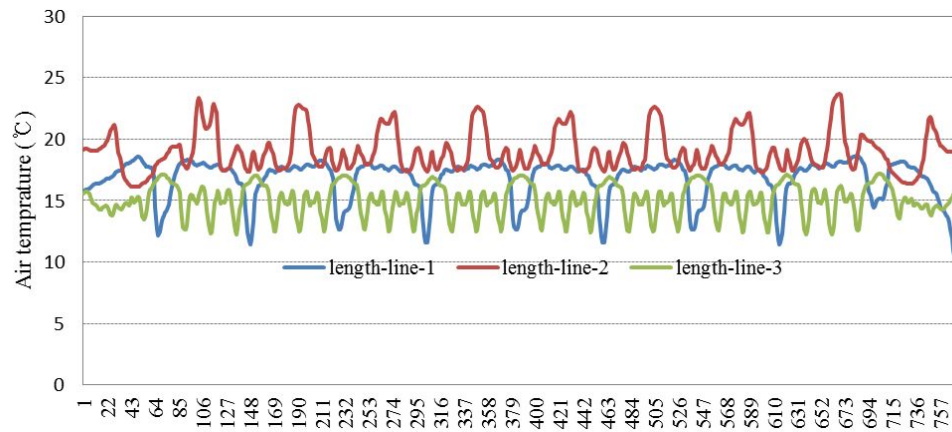


Fig. 3.2.32. 25일령 기준 일반 환기 구조 시스템 (- 15°C 외기 유입),
30초 환기 후 길이 방향 별 온도 모니터링

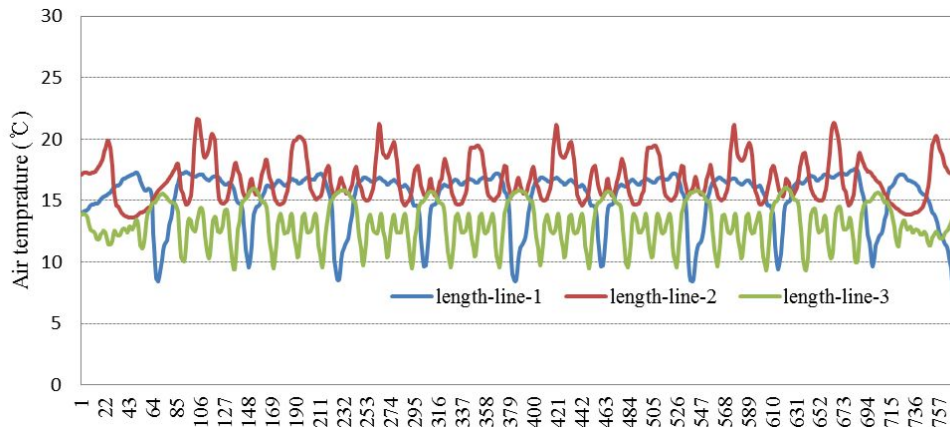


Fig. 3.2.33. 25일령 기존 일반 환기 구조 시스템 (-25°C 외기 유입),
30초 환기 후 길이 방향 별 온도 모니터링

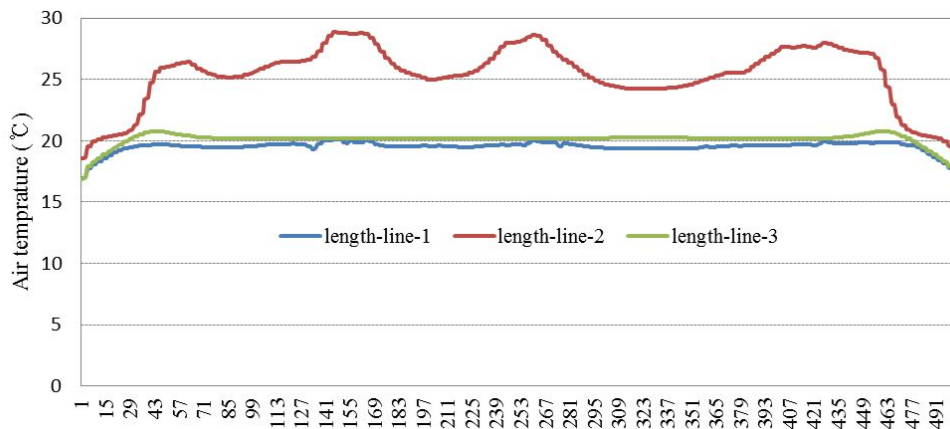


Fig. 3.2.34. 25일령 HRV 환기 구조 시스템 (-5°C 외기 유입),
30초 환기 후 길이 방향 별 온도 모니터링



Fig. 3.2.35. 25일령 HRV 환기 구조 시스템 (-15°C 외기 유입),
30초 환기 후 길이 방향 별 온도 모니터링

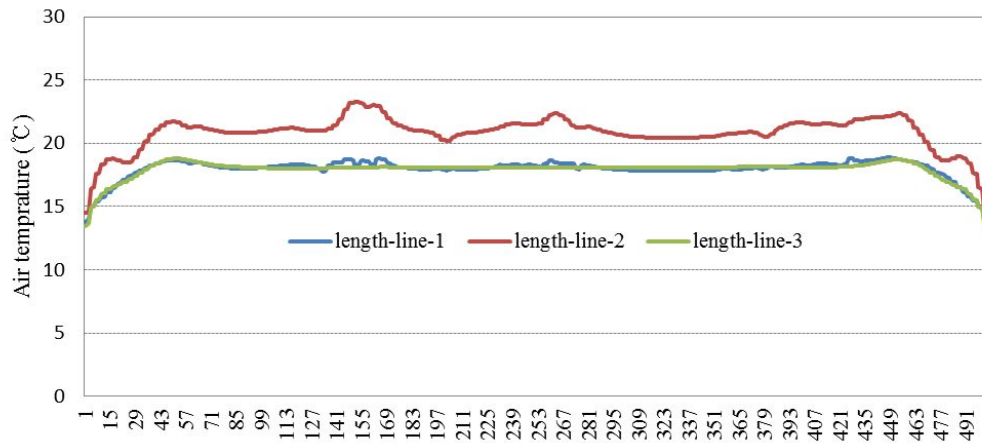


Fig. 3.2.36. 25일령 HRV 환기 구조 시스템 (-25°C 외기 유입),
30초 환기 후 길이 방향 별 온도 모니터링

정성적인 열환경 분석 및 시간 대 별 온도장의 변화 경향을 파악하기 위하여 외기 유입 온도 별, 각 단면의 온도 분포를 살펴보면 다음 그림과 같다. 전면부 온도장의 경우 입기 슬롯을 중심으로 입기 슬롯이 30개 개방되어 있는 측벽, 배기팬이 설치된 측벽, 그리고 배기팬이 설치되어 있는 단면을 나타내며 탑뷰(Top-view)의 경우 바닥으로부터 40cm 높이의 계군에서의 온도장을 의미한다.

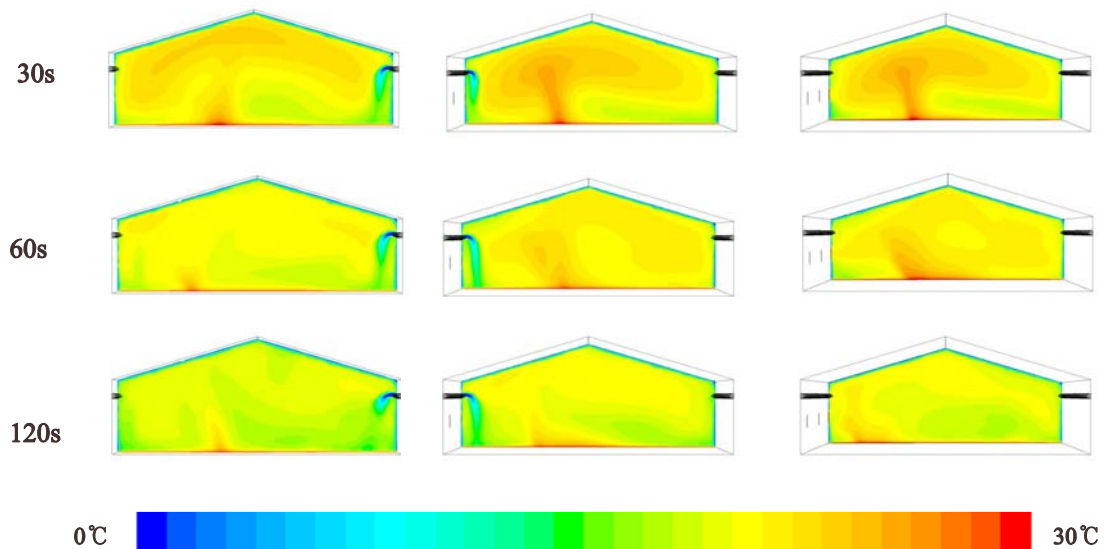


Fig. 3.2.37. 일반 환기 구조 시스템 (외기 조건 -5°C)의 각 단면 별 온도장 분포

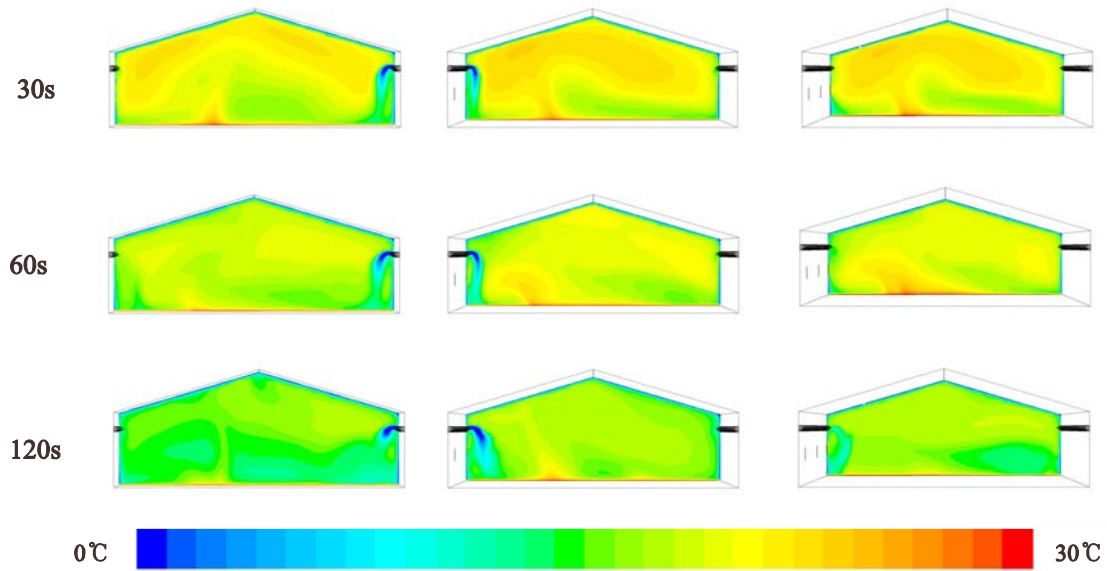


Fig. 3.2.38. 일반 환기 구조 시스템 (외기 조건 -15°C)의 각 단면 별 온도장 분포

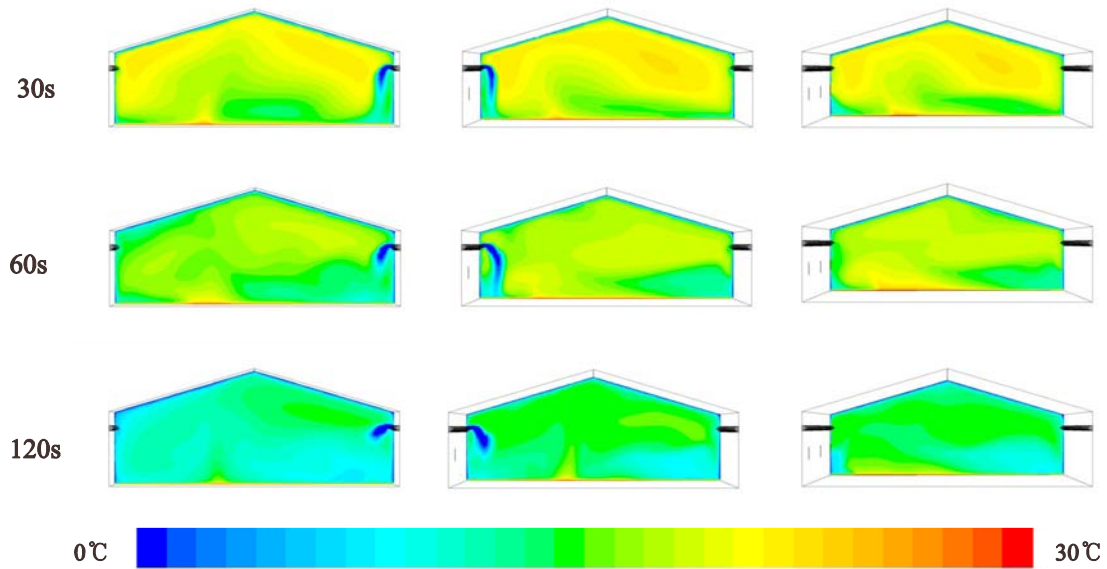


Fig. 3.2.39. 일반 환기 구조 시스템 (외기 조건 -25°C)의 각 단면 별 온도장 분포

일반 환기 구조의 경우 앞선 결과와 마찬가지로 입기 슬롯으로부터 유입된 차가운 외기가 지붕 상단부로 뺏어나가지 못하고 계군으로 바로 떨어지는 현상을 보였으며 외기 기온이 낮을수록 계군 바닥에 도달하는 시간 및 계군 중앙 부를 향하여 퍼지는 현상이 빠르게 나타났다. 따라서 계사 지붕 상단부에 존재하는 열에너지를 전혀 활용하지 못하고 입기되는 외기에 의하여 온도가 하락하는 즉, 열에너지를 급

격히 손실하는 형태의 온도장 분포를 확인할 수 있었다. 계군 바닥 부근에 형성되는 온도장 분포를 통하여 계군에서의 적정성 문제가 야기될 수 있으며 뿐만 아니라 차가운 외기가 그대로 도달함에 따라 호흡기성 질병 문제가 발생할 수 있음을 지적할 수 있다. 2분 연속 운전 기준으로 환기를 작동하였을 때 발생할 수 있을 거라 기대되는 다양한 문제점 해결을 위하여 보다 짧은 주기 조건의 선택 및 환기 시스템의 물리적 형태 개선 및 적정 운영 방안 도출 등과 같은 대책 마련이 시급하다고 판단된다.

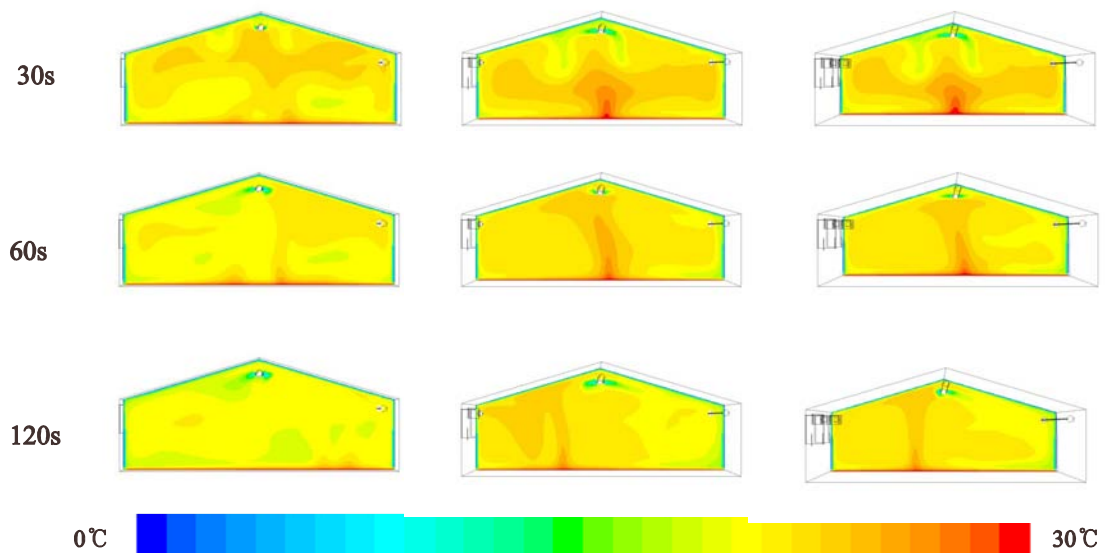


Fig. 3.2.40. HRV 환기 시스템 적용 구조, 외기 조건 -5°C일 때 단면 별 온도장 분포

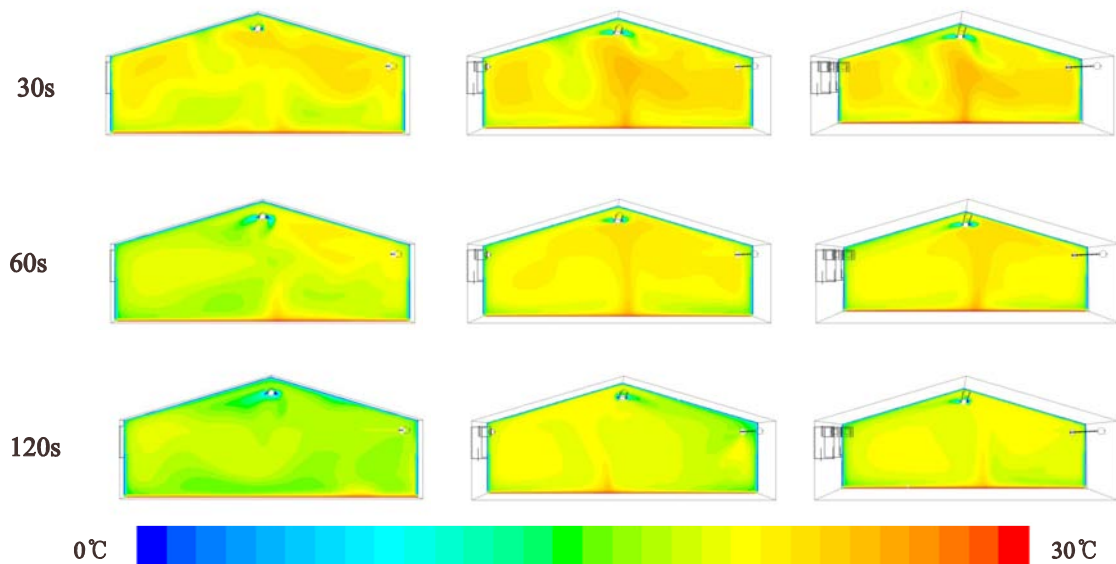


Fig. 3.2.41. HRV 환기 시스템 적용 구조, 외기 조건 -15°C일 때 단면 별 온도장 분포

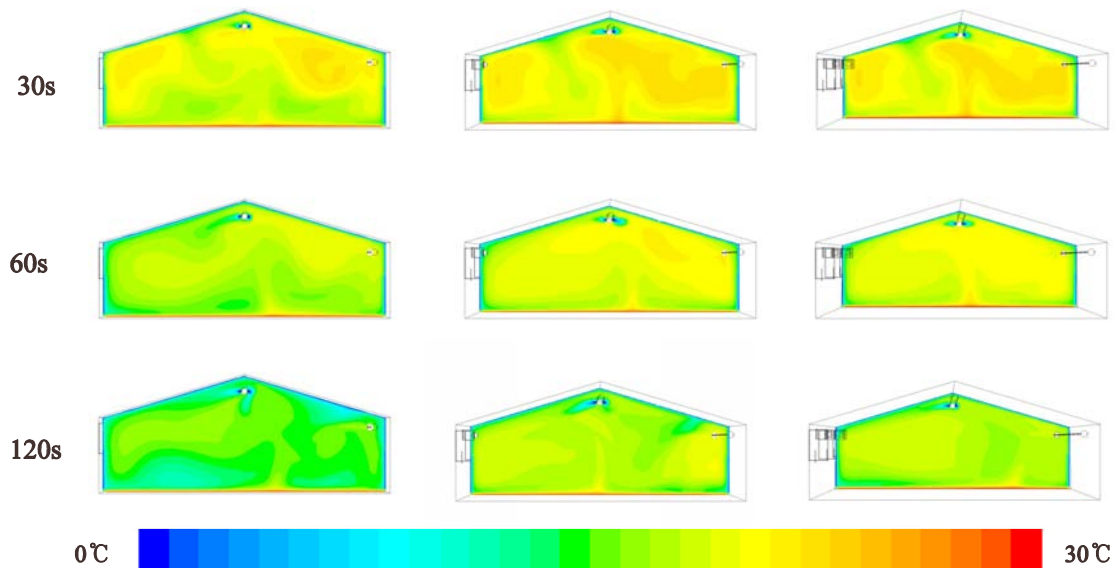


Fig. 3.2.42. HRV 환기 시스템 적용 구조, 외기 조건 -25°C 일 때 단면 별 온도장 분포

25일령 기준 시, HRV 환기 시스템을 적용한 구조에서는 SED 시스템으로부터 유입된 외기가 지붕 상단 덕트를 통하여 분배되며 우측 덕트를 통하여 HRV 시스템을 통하여 가온된 외기가 주입된다. 시간 대 별, 유입 온도 별 온도장 단면을 살펴 보면 환기가 시작된 초기에는 중앙 덕트에서 흘러나오는 차가운 외기가 계군 방향으로 그대로 떨어지는 양상을 보이다가 환기가 계속 됨에 따라 내부 유동장이 형성되고, 이 후 그 유동장에 따라 중앙 덕트로부터 분기되는 외기가 지붕면을 따라 측벽으로 이동한 후 다시 측벽을 타고 계군 반대 중앙 쪽으로 이동하는 양상을 파악할 수 있었다. 이는 계사 내 형성되는 전체적인 유동이 각각의 덕트에서 주입되는 외기류가 계사 체적 내 존재하는 공기들의 부력에 의하여 측면을 타고 크게 순환하는 형태로 나타나기 때문으로 사료된다. 양쪽 측벽을 타고 차가운 외기가 흘러가기 때문에 상대적으로 중앙 부에서 약간 높은 온도 분포를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 전체적으로 기존 일반 환기 시스템에 대하여 풀이한 CFD 시뮬레이션 해석 결과에서 예상되는 문제점, 즉 차가운 외기가 그대로 계군 내 떨어지면서 발생하는 열적 적정성 문제, 길이 방향 및 폭 방향에서 발생하는 온도 편차 문제 면에 있어서 HRV 시스템을 적용할 경우 유리한 열적 효과를 보이는 것을 정성적으로 파악할 수 있다. 따라서 육계 생산과 관련하여 호흡기성 질병 발생 및 열적 스트레스 등으로 야기될 수 있는 문제점을 어느 정도 극복할 수 있는 구조라 판단할 수 있다.

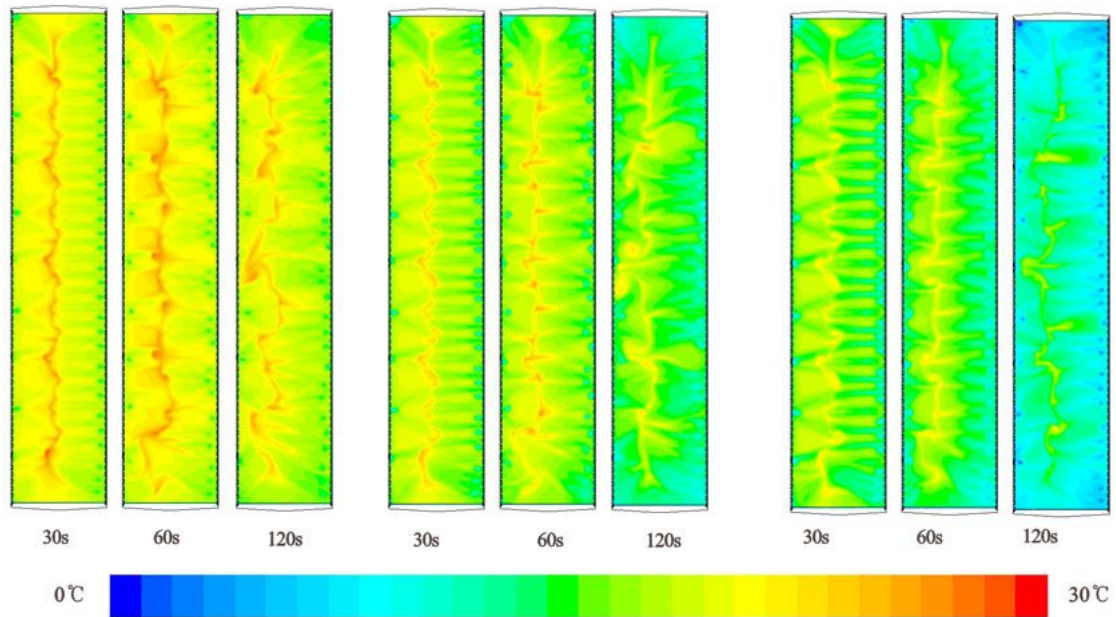


Fig. 3.2.43. 기존 일반 환기 구조의 유입 외기 조건 별 계군 높이 온도장 분포

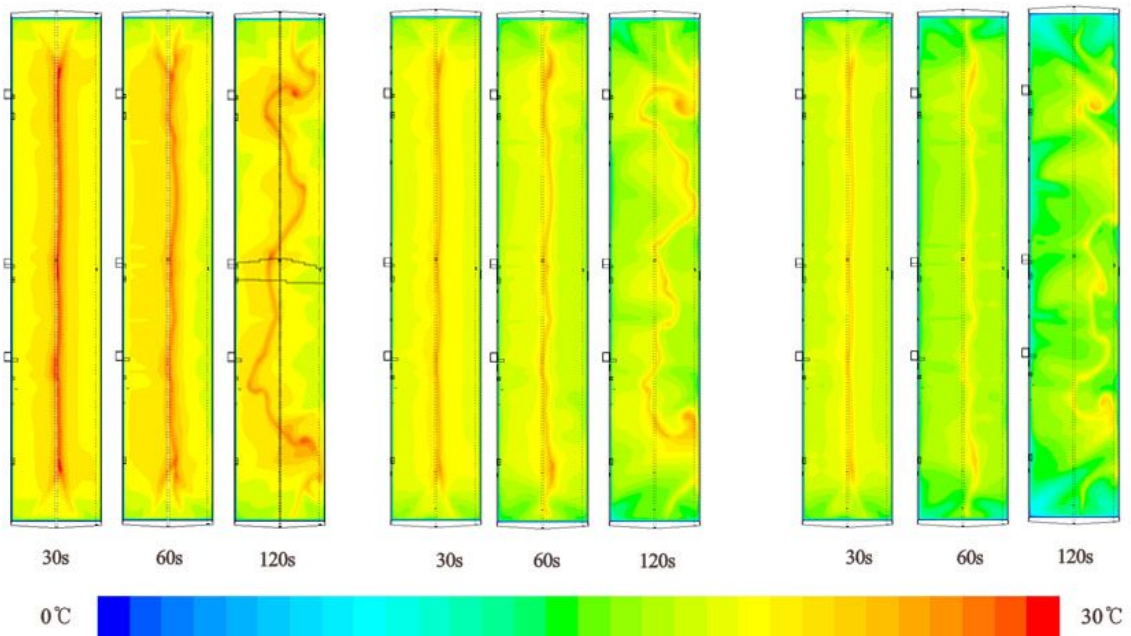


Fig. 3.2.44. HRV 환기 시스템 적용 시 유입 외기 조건 별 계군 높이 온도장 분포

계군 높이 온도장을 살펴볼 경우, 기존 일반 환기 구조에서 입기 슬롯이 존재하는 인근에서는 그렇지 않은 영역에 비하여 낮은 온도 분포를 보이는 것을 확인할 수 있으며 시간이 흐름에 따라 입기 슬롯으로부터 유입된 차가운 외기가 중앙부를

향하여 전진하여 나가고 이로 인하여 온도 편차를 보이는 영역이 점차 증가하는 것을 발견 할 수 있다. 이는 외기 조건이 낮아질수록 더욱 극명한 효과를 보여주며 정성적으로도 생육 시기에 따른 기대 온도 조건을 충족시키지 못하고 영역별 큰 온도 편차를 보이는 등 적정 환경 조건 달성에 어려움을 겪을 것이라 판단된다. 반면 HRV 설치 구조의 경우 상대적으로 보다 균일한 온도 분포 및 전체적으로 높은 온도 분포 추이를 보이는 것을 확인할 수 있으나 시간이 흐름에 따라 기대 온도 대비 다소 온도 편차를 보이는 영역이 증가하는 것이 발견되며 이는 적정 환기 주기 산출 및 운영 방안 제시를 통하여 해결해야 할 부분으로 판단할 수 있다.

계군 높이에서의 정량적인 온도 분석을 실시하기 위하여 벽체 인근(벽체로부터 20cm)을 제외한 계군 높이(바닥으로부터 40cm)에서의 계산 영역 내 모든 Cell 에서의 온도 값을 추출하여(이때 추출된 온도 값의 개수는 약 55,000개로 격자 개수에 기인한다.) 열환경 분석을 실시하면 다음과 같다.

Table 3.2.26. 벽체 인근(20cm)을 제외한 계군 높이(40cm)에서 계산 영역 내 모든 셀에서의 온도 값 추출 및 그에 대한 열환경 분석 결과

t=30s	Average	STDEV.	Highest	Lowest	Diff.	±2°C Ratio	22.5 ±5°C	22.5 ±4.5°C
C_m5	19.5	1.9	28.7	12.2	16.5	79.9	76.8	84.3
HRV_m5	21.5	1.9	29.5	16.7	12.9	82.4	81.0	81.4
C_m15	17.7	2.0	25.0	8.4	16.6	76.5	47.4	57.7
HRV_m15	20.1	1.3	26.5	14.7	11.6	87.9	89.7	91.1
C_m25	15.8	2.2	22.9	4.2	18.7	4.1	17.5	24.1
HRV_m25	19.0	1.3	24.8	13.0	11.8	88.0	87.4	90.3
	Average	STDEV.	Highest	Lowest	Diff.	±2°C Ratio	22.5 ±5°C	22.5 ±4.5°C
C_m5	19.9	2.0	27.6	12.2	15.4	71.7	75.8	80.9
HRV_m5	21.2	1.8	28.6	15.8	12.9	78.6	80.7	81.7
C_m15	17.4	2.2	26.1	7.7	18.3	69.1	37.5	47.4
HRV_m15	19.1	1.6	26.6	13.0	13.6	84.1	81.6	86.3
C_m25	14.5	2.6	22.9	2.6	20.3	57.4	8.4	11.6
HRV_m25	17.3	1.6	24.0	10.4	13.6	83.2	22.6	46.5

*여기서 Diff=Highest-Lowest, STDEV=Standard deviation value, 표준편차

*C_m5는 Conventional ventilation case (minus 5°C)를 의미함

*±2°C Ratio는 해당 시간에서의 전체 온도 데이터 중 평균 온도±2°C 비율

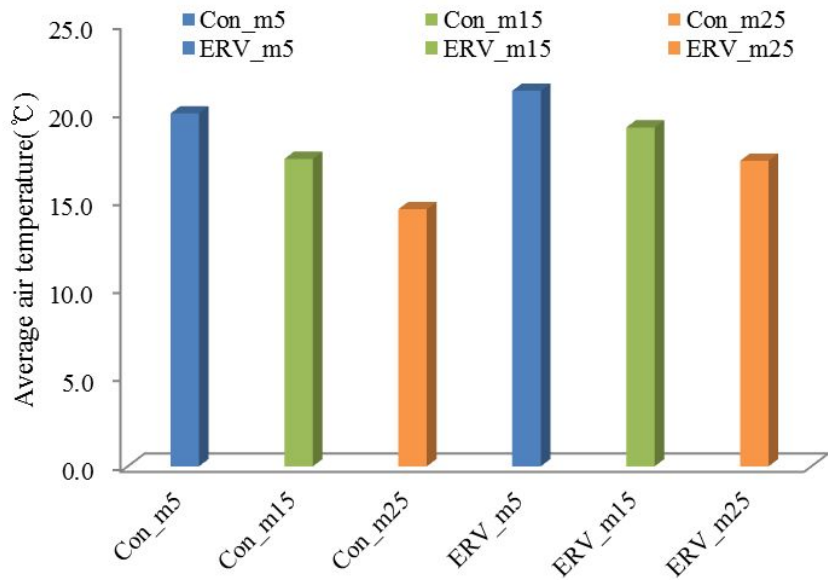


Fig. 3.2.45. 환기 시작 60초 후(연속 운전 시) 계군에서의 평균 온도(°C); 여기서 ERV=HRV를 의미함

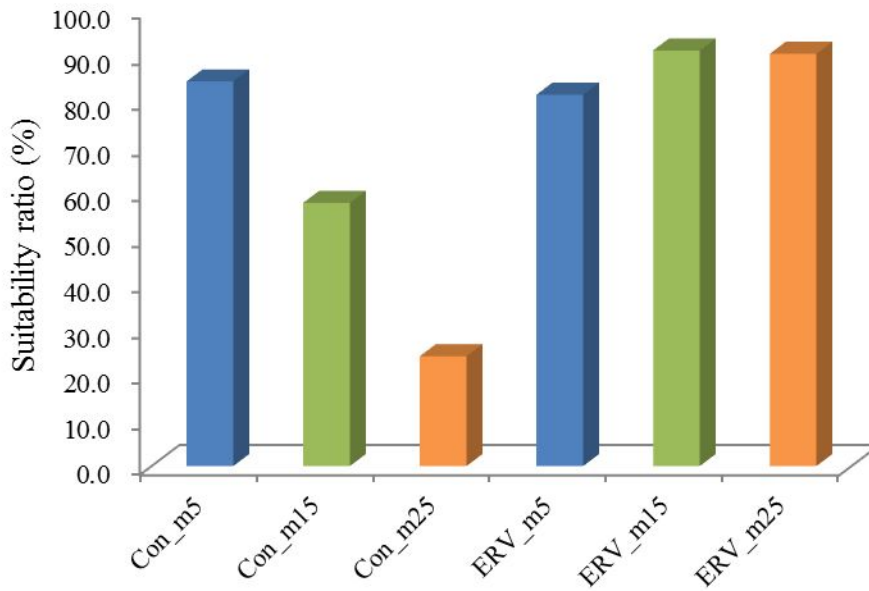


Fig. 3.2.46. 환기 시작 30초 후(연속 운전 시) 계군에서 적정성 지수 비율; 여기서 ERV=HRV를 의미함

25일령 환기량 기준, 계군 높이 계산 영역 내 Cell에서의 온도 값 추출을 통하여 열 환경 분석 결과, 기존 일반 환기 시스템 및 HRV 적용 시스템에서의 열적 편차가

극명히 드러나는 것을 확인할 수 있었다. 외기 조건이 -5°C 일 경우(30초 시), HRV 시스템에서 평균 온도는 1.6°C 가량 높았으며 온도 편차 역시 3.6°C 적게 나타났다. 기존 일반 환기 구조에서 추출된 가장 낮은 온도 값은 12.2°C 로써 기대 적정 온도 기준 22.5°C 에 비하여 무려 10.3°C 가량 낮은 값을 보이는 것으로 나타났다. 평균 온도를 기준으로 2°C 내외의 온도 값을 갖는 비율을 균일성을 평가하는 하나의 지표로써 가정 할 때 30초 때 HRV 시스템이 약 2.5%, 60초 때 6.9% 우수한 것으로 나타났다.

외기 온도 조건이 낮아질수록 두 시스템간의 차이는 극명하게 나타났는데, 30초 시를 기준으로 외기 온도 -15°C 일 때, HRV 시스템의 평균온도가 2.4°C , -25°C 일 때, 3.2°C 높게 나타났으며 온도 균일성 또한 각각 11.4%, 15% 가량 우수한 것으로 나타났다. 반면 일반 환기 구조에서는 최저 온도가 나타는 지점에서의 온도 값이, -15°C 외기 조건 일 때, 8.4°C , -25°C 일 때 무려 4.2°C 까지 하락하는 것으로 나타나 호흡기성 질병이 유발될 수 있는 영역이 존재하는 것으로 판단되었다. 또한 25일령 기준 육계 사육 기대 적정 온도인 22.5°C 를 중심으로 계군 내 온도 분포의 적정성 정도를 파악하기 위하여 추출된 온도 데이터를 토대로 각각 $22.5\pm 5^{\circ}\text{C}$, $22.5\pm 4.5^{\circ}\text{C}$ 범주 안에 속하는 데이터들의 비율을 산정할 때, 외기 조건 -15°C 일 때, 30초 시, 각각 42.3%, 33.4% 가량 우수한 것으로 나타났으며 외기 조건 -25°C 일 때는 30초 시, 각각 69.9%, 38.9% 가량 우수한 것으로 나타나 HRV 시스템 설치에 따른 열적 효율이 상당히 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 환기가 진행 된 후, 60초가 지난 후의 경우 유입온도 -5°C , -15°C 에서도 적정성, 균일성이 향상하는 것을 보였으나 -25°C 의 경우 적정 온도 범주 안에 드는 비율이 22.6, 46.5%로 급격하게 하락하는 것을 보였는데 이는 연속 환기 작동에 따른 결과로써, 이는 외기 온도가 급격히 낮아질수록 환기 주기를 짧게 조절하는 등과 같은 노력이 필요함을 의미한다. 따라서 향후 환기 주기 산정에 있어서 외기 조건에 따라 적절한 열환경 조성을 위하여 주기 조절에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 상기 데이터 분석을 통하여 HRV 시스템 적용 시, 일반 환기 구조 대비 열적 균일성 및 적정성이 우수하다는 결론을 내릴 수 있었으며 그 효과는 외기 조건이 낮아질수록 더욱 극명하게 나타나는 것으로 확인되었다. 다만, 외기 온도가 급격히 낮아질수록 적절한 환기 주기 선정이 필수적일 것이라 판단된다.

외기 조건에 따라 계군 높이 평균 온도를 중심으로, 기존 일반 환기 구조 시스템 대비 HRV 환기 시스템 적용 구조의 온도 차를 이용하여 동일 열에너지량을 갖기 위하여 기존 일반 환기 구조에 투입해야 되는 열량을 계산해보면, 외기 -5°C 일 때, 30초 시 2638.8kcal, 60초 시, 1707.2kcal 값을 산출 할 수 있다. 외기 조건이 -15°C

일 경우에는 각각 3263.9kcal, 2359.1kcal, -25℃ 조건 일 경우 4258.5kcal, 3635.7kcal로 계산되었으며 이는 HRV 시스템 설치 시 해당 시각에서 제시된 값 들 만큼의 에너지 절약 효과를 누리고 있다고 혹은 기존 일반 환기 시스템에서 동일한 평균 온도 값을 갖기 위하여 해당 열량만큼의 에너지를 열풍기 등과 같은 기타 보온 시설을 통하여 공급해줘야 된다고 판단할 수 있다.

Table 3.2.27. 시간 대 별 계군 평균 온도 (℃) 및 동일 열에너지를 갖기 위한 열량 투입량 (kcal)

※ 25일령 기준, 외기 조건 -5℃일 경우				
	C_m5	HRV_m5	Diff.	Q
t=30s	19.5	21.5	2.0	2638.8
t=60s	19.9	21.2	1.3	1707.2
※ 25일령 기준, 외기 조건 -15℃일 경우				
	C_m15	HRV_m15	Diff.	Q
t=30s	17.7	20.1	2.4	3263.9
t=60s	17.4	19.1	1.7	2359.1
※ 25일령 기준, 외기 조건 -25℃일 경우				
	C_m25	HRV_m25	Diff.	Q
t=30s	15.8	19.0	3.2	4258.5
t=60s	14.5	17.3	2.8	3635.7

(2) SED 시스템의 적용을 통한 열적 균일성 개선 정도 파악

HRV 환기 시스템이 설치된 육계사 내부에 추가적으로 설치되어 있는 SED 시스템의 경우 기대 설계 환기량이 HRV 시스템을 통하여 모두 충족 가능할 경우 내부 순환을 통한 내부 환경 인자들의 균일성 향상 효과를 누리기 위하여 이용되며, 기대 설계 환기량을 충족시키지 못할 경우 가변식으로 시설 외기를 투입하기 위한 입기구의 한 방편으로써 활용된다. 본 연구에서는 총 3기의 SED 시스템이 설치되어 있으며 각각의 SED는 육계사 중앙 지붕 측 덕트와 연결되어 내부 순환 시에는 SED를 통하여 유입된 내부 공기가 다시 중앙 덕트로 분배되어 순환하는 형태로 작동되며 외기 유입 시에는 마찬가지로 시설 밖 외기류가 중앙 덕트를 통하여 분배되는 형식으로 작동된다. 본 연구에서는 계산 영역 설계 시, 보다 경제적인 격자 설계 및 연산 수행 시간고려를 위하여 계사 폭 방향으로 SED 시스템과 중앙 덕트를 연결하는 덕트 부분을 생략하였으므로 경계 조건의 새로운 정의를 통하여 SED를 통

하여 유입된 시설 내부 공기 혹은 외기가 중앙 덕트로 분배될 수 있게끔 하는 일련의 작업이 필요하다. 따라서 이를 c언어를 이용하여 상기 상황을 구현할 수 있는 알고리즘을 작성하고 CFD 해석 과정에 Main-Solver로 활용한 FLUENT에 UDF(User defined function) 기능을 통해 연동 후, 수치해석이 수행되는 때 시간 간격마다 SED 입기구를 구성하고 있는 각 Cell에서의 온도, 풍량 값을 모니터링하고 이를 중앙 덕트에서 분배할 수 있도록 프로그램을 구성하였다.

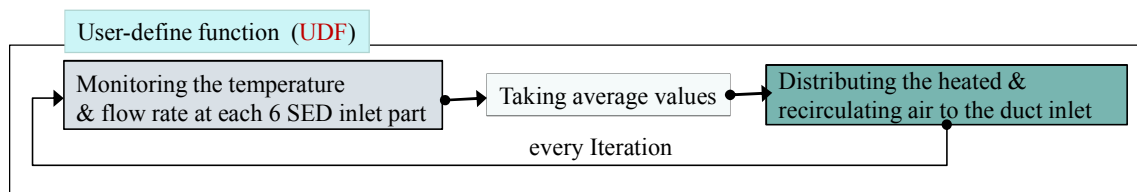


Fig. 3.2.47. SED로부터 분배되는 내부 순환/외기 유입 구현을 위한 UDF 작성 알고리즘

육계 생육 시기 별 기대 환기량이 9,000CMH 이하일 경우, 시설 내부 기류 순환을 통하여 온도 등 각종 환경 요인의 균일성 향상을 달성하기 위하여 SED 시스템을 부가적으로 설치하였다. 총 3기의 시스템이 설치되어 있으며 상기 언급한 환기량 이하일 경우, SED 시스템을 통하여 유입된 시설 내부 기류가 계사 지붕 하단 중앙부에 설치되어 있는 중앙 덕트를 통하여 재공급됨으로써 계사 체적 내 존재하는 열 에너지의 순환을 통하여 전체적인 균일성을 향상시키는데 그 목적이 있다. 외기 조건이 -15℃일 경우, 2분 동안 연속 환기를 실시하였을 때 바닥으로부터 40cm 높이의 계군에서의 시간대 별 영역 별 온도 분포는 다음과 같다.

Table 3.2.28. HRV 및 SED 시스템 부가 설치에 따른 (-15℃) 작동 10초 후 지역별 온도 분포(℃)

t=10s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
HRV	25.3	27.4	25.3	26.0	28.0	25.9	26.0	28.0	25.9	25.9	28.0	25.9
HRV+ SED	25.4	27.4	25.2	25.9	28.1	25.8	26.1	28.1	25.8	25.9	28.1	25.8
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.		STDEV.			
HRV	25.4	27.4	25.3	26.4	28.0	25.3	2.7		1.1			
HRV+ SED	25.4	27.4	25.3	26.4	28.1	25.2	2.8		1.1			

Table 3.2.29. HRV 및 SED 시스템 부가 설치에 따른 (-15℃) 작동 30초 후 지역별 온도 분포(℃)

t=30s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
HRV	22.5	23.2	22.1	23.1	23.6	22.6	23.1	23.7	22.6	23.0	23.6	22.7
HRV+ SED	22.8	22.5	22.2	22.7	22.6	22.3	23.0	22.7	22.2	22.8	22.7	22.3
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
HRV	22.6	23.2	22.1	22.9	23.7	22.1	1.6	0.5				
HRV+ SED	22.7	22.5	22.2	22.5	23.0	22.2	0.8	0.3				

Table 3.2.30. HRV 및 SED 시스템 부가 설치에 따른 (-15℃) 작동 60초 후 지역별 온도 분포(℃)

t=60s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
HRV	22.0	22.7	21.2	23.0	23.6	22.3	22.8	23.6	22.3	22.7	23.5	22.2
HRV+ SED	20.9	21.7	20.4	21.1	21.8	20.8	21.0	22.0	21.1	21.0	21.8	20.8
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
HRV	21.9	22.8	21.2	22.5	23.6	21.2	2.4	0.8				
HRV+ SED	20.8	21.6	20.3	21.1	22.0	20.3	1.6	0.5				

Table 3.2.31. HRV 및 SED 시스템 부가 설치에 따른 (-15℃) 작동 120초 후 지역별 온도 분포(℃)

t=120s	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
HRV	18.7	19.6	18.2	20.4	20.6	19.2	20.1	20.6	19.2	19.9	20.7	19.0
HRV+ SED	17.7	18.4	17.5	18.4	18.4	17.5	18.3	18.7	17.6	18.6	18.2	17.3
	5-1	5-2	5-3	Average	Highest	Lowest	Diff.	STDEV.				
HRV	18.5	19.6	18.4	19.5	20.7	18.2	2.5	0.9				
HRV+ SED	17.9	18.2	17.4	18.0	18.7	17.3	1.5	0.5				

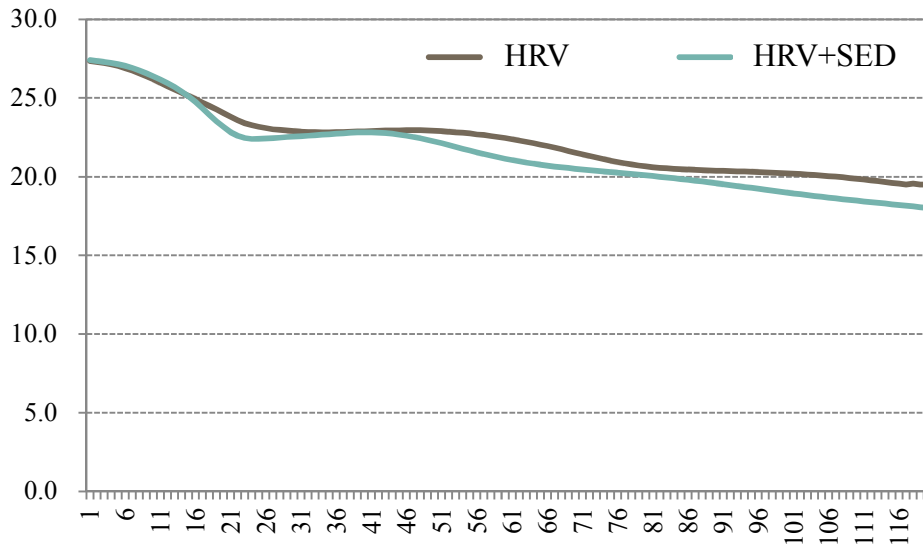


Fig. 3.2.48. 외기 조건 -15°C일 경우 HRV 환기 시스템 및 SED 시스템 추가 설치에 따른 시간별 계군 평균 온도 추이(°C)

HRV 시스템 설치 및 HRV 시스템에 추가적으로 SED 를 설비하였을 때 시간 대 별 계군 높이에서의 영역별 평균 온도 추이를 살펴보면 환기가 시작된 지 10초가 지난 후에는 평균 온도 및 균일성 측면에서 거의 차이를 보이지 않았으나 30초 이후에는 SED 설치 시 평균 온도가 약 -4°C 가량 하락하는 현상을 보였다. 그러나 최고-최저 온도 편차가 0.8°C 정도로 1.6°C의 온도 편차를 보인 HRV 시스템 단독 설치 구조보다 0.8°C 가량 낮은 온도 편차를 보였으며 균일성(표준편차 값을 이용한 비교 시) 측면에서도 향상됨을 확인할 수 있었다. 60초가 지난 후에는 평균 온도가 약 1.4°C 정도 하락하였으나 온도 편차가 약 0.8°C로 줄어들며 영역 별 온도 값에 대한 표준 편차 역시 감소함을 보였다. 120초가 지난 후에도 마찬가지로 평균 온도는 1.5°C 가량 하락하였으나 온도 편차는 무려 1°C 및 균일성에서 큰 향상 효과를 보인 것을 확인할 수 있었다. 시간 대 별 계군 평균 온도를 모니터링 하여 이를 도 시해볼 경우, 10초까지는 동일한 온도 구배를 보였으나 10초 이후 SED 시스템을 적용할 경우 동일 시각에서의 HRV 단독 구조에서의 온도 값 대비 약 0.5~1.0도 가량 하락하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 온도 하락 요인으로는 SED 시스템 가동에 따라 우측 덕트에서 분기되는 HRV 시스템을 통하여 가온된 외기를 보다 활발하게 순환시켜주면서 발생하는 서로 다른 열용량을 보유하는 공기의 혼합 문제 및 대류 열손실 등의 원인을 지적할 수 있다.

환기가 시작된 후 30초가 지난 후를 기준으로 길이 방향 별로 온도 데이터를 추출하여 열적 균일성 향상 정도를 비교하면 다음과 같다.

Table 3.2.32. 11일령 기준 HRV 환기 시스템 및 SED 추가 설치에 따른 계군 높이, 길이 방향 별 온도 모니터링; Length-line-1 영역(℃)

11일령 기준, Length-line-1 온도 데이터 모니터링 값					
t=30s	Highest	Lowest	Diff.	Average	STDEV
HRV	22.9	18.8	4.1	22.1	0.6
HRV+S	23.6	20.7	2.9	22.2	0.5

Table 3.2.33. 11일령 기준 HRV 환기 시스템 및 SED 추가 설치에 따른 계군 높이, 길이 방향 별 온도 모니터링; Length-line-2 영역(℃)

11일령 기준, Length-line-2 온도 데이터 모니터링 값					
t=30s	Highest	Lowest	Diff.	Average	STDEV
HRV	25.4	22.9	2.5	24.4	0.5
HRV+S	24.1	21.9	2.2	22.9	0.4

Table 3.2.34. 11일령 기준 HRV 환기 시스템 및 SED 추가 설치에 따른 계군 높이, 길이 방향 별 온도 모니터링; Length-line-3 영역(℃)

25일령 기준, Length-line-3 온도 데이터 모니터링 값					
t=30s	Highest	Lowest	Diff.	Average	STDEV
HRV	22.9	18.2	4.7	22.2	0.7
HRV+S	22.5	20.2	2.3	21.8	0.3

환기가 시작된 지 30초가 지난 시점에서의 길이 방향 별 온도 데이터를 분석해보면, 앞선 영역별 온도 데이터 분석 결과에서 SED 시스템을 부가적으로 설치할 경우 전체적으로 온도 하락 현상을 보였던 결과에 반하여 HRV 시스템이 설치된 측벽 인근의 경우 최고 온도가 약 0.7℃, 최저 온도가 1.9℃ 정도 높게 나타났다. 평균 온도는 거의 유사하게 나타났으며, 그 외 중앙부 및 반대쪽 측벽 인근 길이방향에 따른 모니터링 영역 결과에서는 앞선 결과와 유사하게 평균 온도가 하락하는 현상을 보였다. 그러나 반대쪽 측벽 인근 영역의 경우 최저 온도가 상승하는 등 계군 열환경 조성에 있어서 긍정적인 효과를 보이는 것으로 나타났다. 전체적으로 온도 편차는 중앙부 0.3℃, 측벽 인근의 경우 각각 1.3℃, 2.4℃ 감소효과를 보여 길이방향 별로 상대적으로 균일하게 온도 분포가 이루어지는 것으로 확인되었으며 추출된 데이터들의 표준 편차 값을 이용하여 균일성을 판단할 경우 모든 영역에서 균일성

이 상승하는 효과를 보였으며 특히 HRV 설치 측벽 반대쪽 측벽에서 균일성 효과가 가장 극명하게 드러나는 것을 알 수 있었다. 길이방향 별 추출된 온도 값을 바탕으로 이를 도시화 해볼 경우 HRV 시스템만을 적용할 경우, 계사 내부 형성되는 유동장의 영향(우측 덕트를 통하여 유입된 외기가 자체 부력으로 인하여 계군 상단부의 공기와 혼합된 후 반대쪽 측벽을 타고 시계 반대방향으로 크게 순환하는 형태)으로 계군 중앙부에서 상대적으로 높은 온도 분포를 보이는 현상에 비하여 거의 모든 영역에서 거의 유사한 열환경이 조성되는 것으로 나타나 길이방향 별 균일성 향상에 상당히 긍정적으로 기여를 하고 있는 것으로 판단되었다.

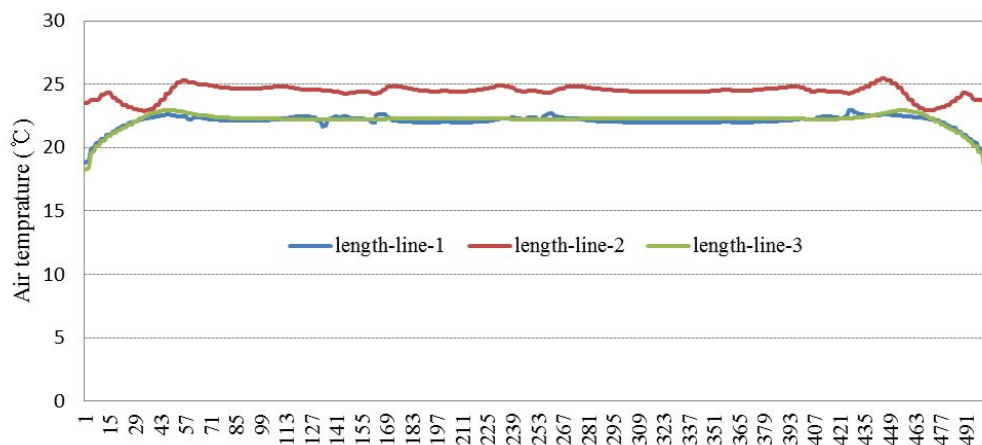


Fig. 3.2.49. 11일령 기준, HRV 시스템 단독 설치에 따른 길이 방향 별 온도 분포

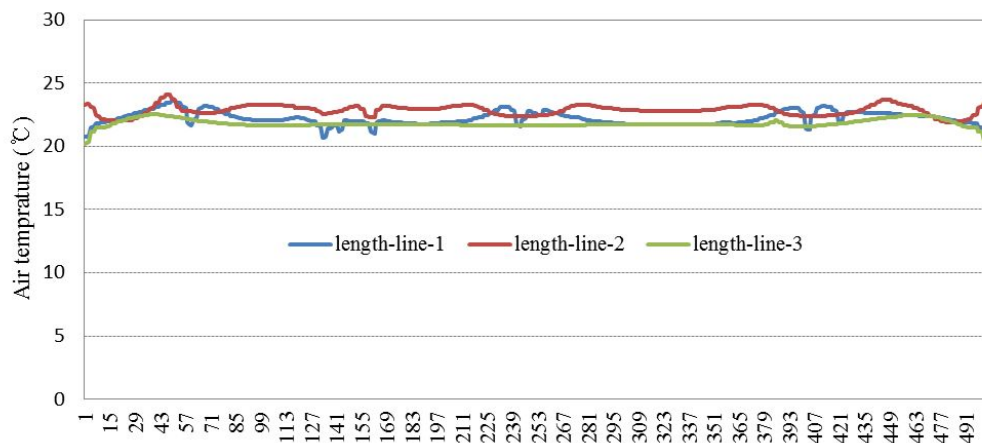


Fig. 3.2.50. 11일령 기준, HRV 시스템 및 SED 시스템 추가 설치에 따른 길이 방향 별 온도 분포 추이

정성적인 열환경 분석 및 SED 시스템 추가 설치에 따른 시간대 별 온도장 경향

을 파악하기 단면 별 온도 분포를 살펴보면 다음과 같다. 탑뷰(Top-view)의 경우 바닥으로부터 40cm 높이 계군에서의 온도장을 의미한다.

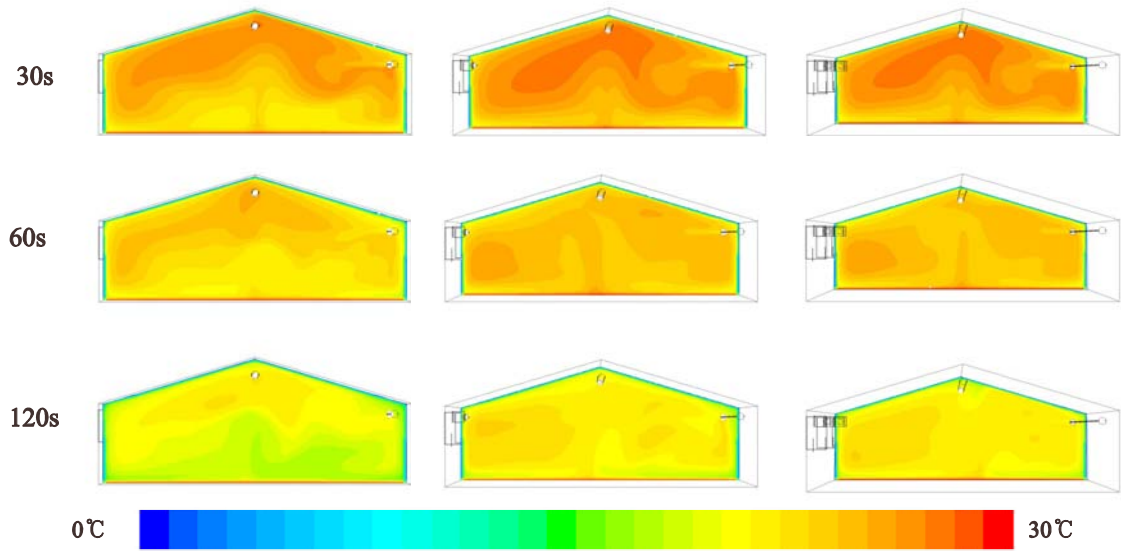


Fig. 3.2.51. HRV 환기 시스템 적용 구조의 단면 별 온도장 분포

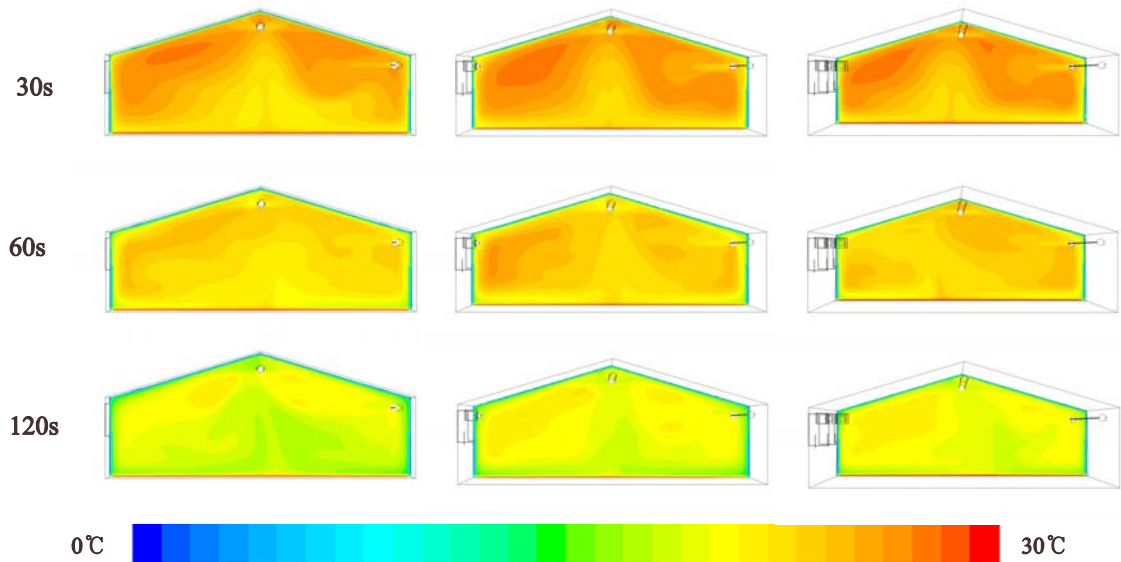


Fig. 3.2.52. HRV 환기 시스템 및 SED 시스템 추가 적용 구조의 단면 별 온도장 분포

단면 별 온도장의 경우 HRV 환기 시스템 단독 설치 구조 및 SED 시스템 추가 설치 구조에서 정성적으로 큰 차이를 보이지는 않으나 중앙 덕트에서 분기되는 내부 기류에 의하여 SED 추가 설치 시 기류가 지붕을 타고 양쪽 측벽을 향하여 순환하

는 형태의 유동장 및 그에 기인한 온도 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다.

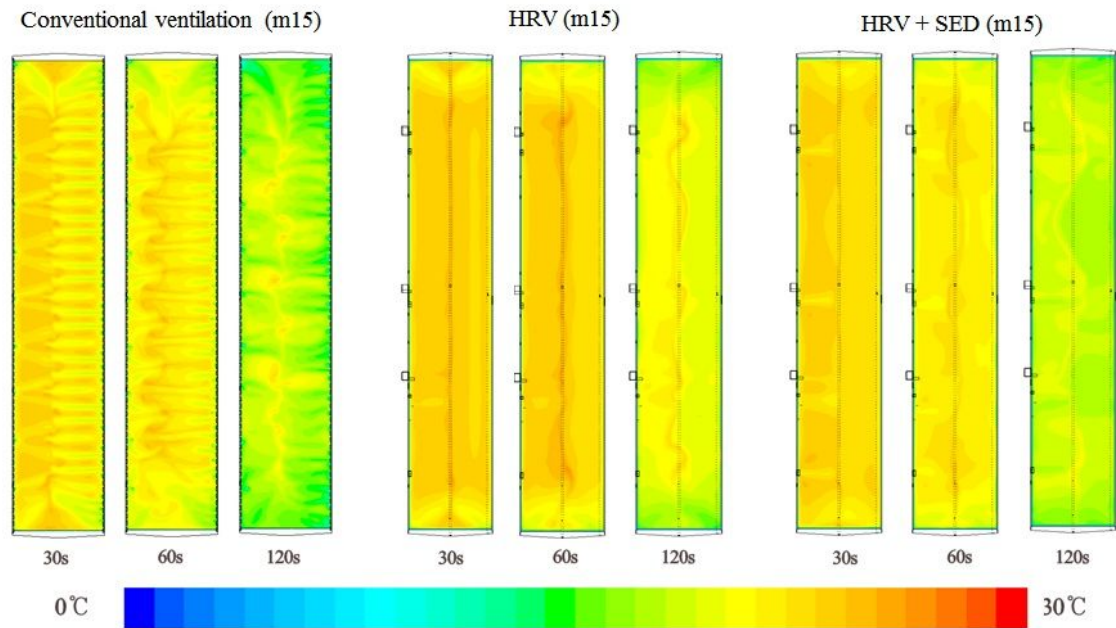


Fig. 3.2.53. 외기 조건 -15°C , 기존 일반 환기 시스템, HRV 단독 설치 그리고 HRV 및 SED 추가 설치에 따른 계군 높이 시간대 별 온도 분포

상기 그림은 동일 외기 조건(-15°C)에 대하여 기존 일반 환기 시스템 및 SED 시스템 추가 설치에 따른 계군 높이의 시간대 별 온도 분포이다. 앞서 지적하였던 기존 일반 환기 시스템의 열적 균일성, 적정성 문제(입기 슬랏 입지에 따른 극심한 온도 편차 발생 및 적정 온도 이하로 하락하는 현상)는 HRV 환기 시스템 및 SED 시스템의 설치를 통하여 해결될 수 있었다. SED 시스템을 추가로 설치할 경우, 계군 높이 온도장 결과를 통하여 HRV 단독 설치 시 지역 별로 약간의 온도 편차를 보이던 영역이 어느 정도 균일하게 혼합되어 일정한 온도를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 특히 HRV 단독 설치 구조에서 나타나는 계군 중앙부의 온도 상승 문제 역시 SED 시스템을 통하여 상대적으로 균일한 분포(온도 구배를 보이던 영역에서 그 구배 정도가 감소함)를 보일 수 있었다. 계군 높이에서의 정량적인 온도 분석을 실시하기 위하여 벽체 인근(벽체로부터 20cm)을 제외한 계군 높이(바닥으로부터 40cm)에서의 계산 영역 내 모든 Cell 에서의 온도 값을 추출하여(이때 추출된 온도 값의 개수는 약 55,000개로 격자 개수에 기인한다.) 열환경 분석을 실시하면 다음과 같다.

Table 3.2.35. 벽체 인근(20cm)을 제외한 계군 높이(40cm)에서 계산 영역 내 모든 셀에서의 온도 값 추출 및 그에 대한 열환경 분석 결과

t=30s	Average	STDEV.	Highest	Lowest	Diff.	±2°C Ratio	27.5 ±5°C	27.5 ±4.5°C
HRV	23.1	0.9	25.9	17.9	8.0	95.5	86.9	70.3
HRV+ SED	22.7	0.6	24.5	19.9	4.6	99.9	72.1	33.0
t=60s	Average	STDEV.	Highest	Lowest	Diff.	±2°C Ratio	27.5 ±5°C	27.5 ±4.5°C
HRV	22.8	1.2	26.3	17.2	9.1	89.7	77.5	48.7
HRV+ SED	21.3	0.9	24.4	17.5	6.9	97.7	5.9	1.8

*여기서 Diff=Highest-Lowest, STDEV=Standard deviation value, 표준편차

*C_m5는 Conventional ventilation case (minus 5°C)를 의미함

*±2°C Ratio는 해당 시간에서의 전체 온도 데이터 중 평균 온도±2°C 비율

추출된 온도 데이터를 토대로 계군 영역 내 열환경 분석 결과 평균 온도의 경우 환기가 시작된 후 30초 후 HRV 시스템만 설치할 경우 23.1°C, SED를 추가 설치할 경우 22.7°C로 나타났으며 60초 후의 경우 각각 22.8°C, 21.3°C로 SED 설치에 따라 평균 온도가 약 0.4~1.5°C 정도 하락하는 현상을 보였다. 이는 앞서 언급했듯이, 상대적으로 높은 열에너지를 갖고 있는 계군(계군을부터의 발열량), 지붕 하단 부근의 열에너지와 HRV를 통하여 주입되는 외기 및 벽체로부터의 열손실로 인한 온도 저하가 발생한 부분 등의 공기를 혼합하는데 있어서 SED 시스템이 어느 정도 기여를 한 결과라고 간주된다. 표준편차 값의 경우 각각 0.3°C 정도 하락하는 결과를 보였으며 온도 편차의 경우 각각 3.4°C, 2.2°C 하락하여 계군 내 열환경 조성에 긍정적으로 기여했다고 판단할 수 있다. 추출된 전체 온도 데이터 중 평균온도를 기준으로 2°C 내외의 온도 데이터를 갖는 비율을 일종의 균일성을 평가할 수 있는 지수라고 가정할 후 이를 계산해보면 30초 시, SED 설치에 따라 4.4%, 60초 시, 8% 가량 상승되는 것으로 나타나 균일성 측면에서 SED 시스템의 기여 정도를 판단할 수 있었다. 단, 생육 온도의 적정성을 판단하기 위하여 11일령 적정 온도 인 27.5°C를 기준으로 적정성 지수를 판별해봤을 때, SED를 추가 설치한 구조에서 적정성 지수가 급격히 떨어지는 결과가 도출되었다. 하지만 이는 현 연구단계에서 각각의 환기 시스템을 연속 운전으로 가정하여 총 2분 가량(해당 데이터는 각각 30초 및 60초) 해석한 결과로써, HRV 단독 설치 구조에 비하여 온도 하락율이 높았기 때문으로 사료된다. 그러므로 현 단계에서의 적정성 지수 판단은 적절하지 않으며, 이는 효과적

이고 적절한 계군 사육 및 온도 지수의 적정성 달성을 위하여 정확한 환기 주기를 제시해야 함을 의미한다.

(3) 응결 현상을 고려한 내부 공기 거동 모의

동절기 흔히 발견되는 문제점 중 하나는 시설 내·외부 온도 및 습도 차이에 따른 입기류의 응결현상이다. 습공기의 수분 함량에 따라 비열, 열용량 등 열에너지량과 온도 변화 간의 차이가 발생할 수 있으며 응결 현상 등과 같이 습공기가 보유하고 있는 수분의 상변화 시, 잠열에 의하여 현열 에너지량이 변화하므로 CFD 해석 시 습공기 구현에 대한 고찰이 필요하다. 습도 및 응결 현상을 고려한 CFD 시뮬레이션은 크게 두 단계로 구성되었다. 첫째로, 동일 외기 조건에 대하여 시설 내부에서 다른 상대 습도 조건을 가질 때 내부 열환경 해석에 있어서 민감도에 대한 시험을 수행하였으며 두 번째로, 동일 외기 조건에 대하여 외기가 계사 체적 내부로 유입 시, 상변화에 의한 응결 현상 구현 여부에 따른 열환경 해석을 수행하였다.

응결현상을 구현하기 위해서 c언어로 작성된 일련의 알고리즘을 토대로 UDF 기능을 이용하여 수치 해석 매 계산 간격마다 이를 실행할 수 있도록 프로그램을 구성하였다. 여기서 작성된 알고리즘은 시뮬레이션 계산 영역을 대상으로 온도, 수증기량을 실시간으로 추출하고 이를 바탕으로 포화수증기량을 산출하고 만약 현재 수증기량이 포화 수증기량을 초과할 경우 그 잉여량에 대하여 응결량을 계산하고 이에 따른 잠열 발생량을 계산하도록 구성된다. 이에 관련된 이론 식 및 알고리즘은 다음과 같다.

$$\ln(P_{ws}) = \frac{A_1}{T} + A_2 + A_3 T + A_4 T^2 + A_5 T^3 + A_6 \ln(T) \quad \text{식 (3.2.10.)}$$

여기서, $A_1 = -5.8002206 \times 10^3$, $A_2 = 1.3914994 \times 10^0$, $A_3 = -48.640239 \times 10^{-3}$, $A_4 = 41.764768 \times 10^{-6}$, $A_5 = -14.452093 \times 10^{-9}$, $A_6 = 6.5459673 \times 10^0$, T 는 시설 내부 온도, K, P_{ws} 는 포화수증기압, pa를 의미한다.

$$w = 0.62198 \times \frac{P_{ws}}{P_a - P_{ws}} \quad \text{식 (3.2.11.)}$$

여기서, w 는 포화습도비, P_a 는 대기압(=101,325pa), P_{ws} 는 포화수증기압, pa를 의미

한다.

$$h = 2,500,000 - 2,500 \times T \quad \text{식 (3.2.12.)}$$

여기서, h 는 습공기의 엔탈피, Jkg^{-1} , 물의 증발 잠열은 $0^\circ C$ 일 때 $2.50 \times 10^6 Jkg^{-1}$, T 는 시설 내부 온도, $^\circ C$ 를 의미한다.

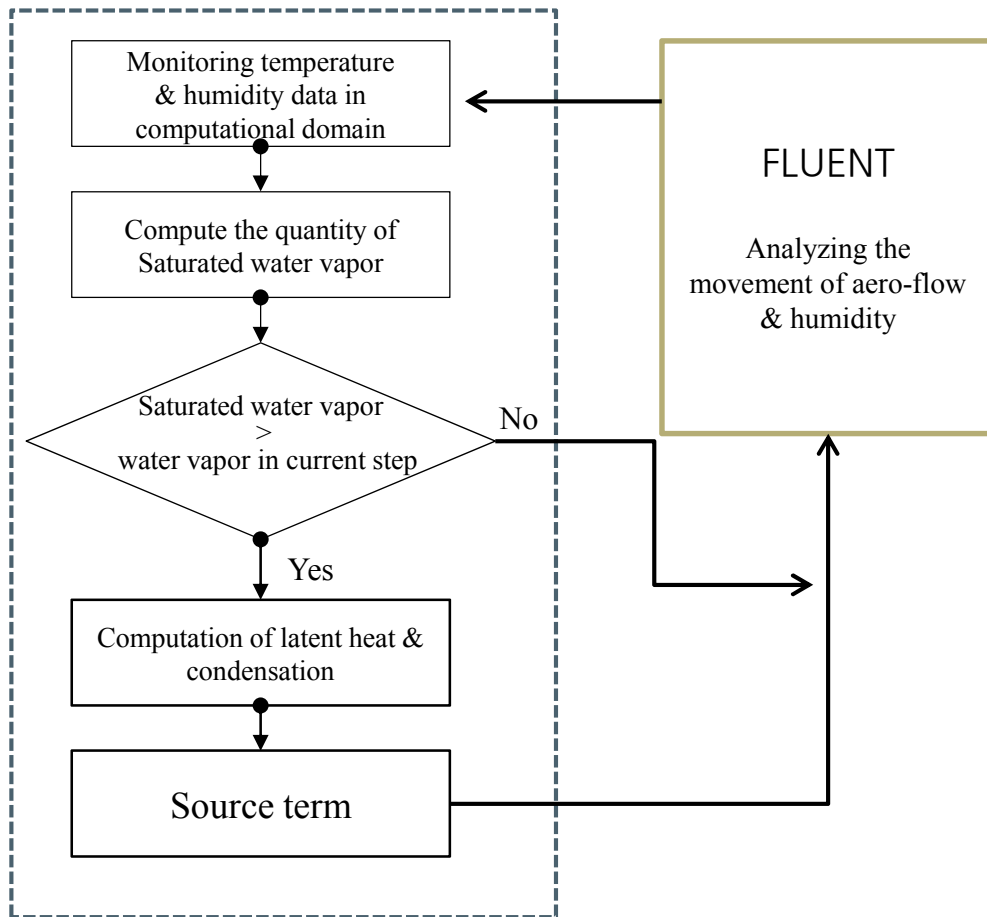


Fig. 3.2.54. 수증기, 온도 모니터링을 통한 포화수증기량 산정 및 그에 따른 응결 현상 모델링 알고리즘

먼저 수분 응결량에 대한 알고리즘을 토대로 UDF 기능을 이용하여 FLUENT에 연동한 응결 및 잠열 발생 함수 동작에 대한 검사를 위하여 2D 시뮬레이션을 실시하고 응결 현상 발생 유무에 따른 온도장 변화, 유동장 변화 등을 분석하였다. 여기서 해석 대상 구조는 다음과 같은 2차원의 계사 형태의 가상의 공간을 구성하였다.

입기구는 지붕과 측벽이 접하는 인근에 위치하며, 배기구는 바닥 근처에 존재한

다고 가정하였다. Zone 1 영역은 응결 현상이 고려되지 않는 구조이며 Zone 2 영역은 응결 현상 고려를 위한 UDF 함수를 적용한 구조이다. 측정점 별 온도 및 응결량 데이터 측정 지점은 간단하게 입기구 인근, 중앙부, 입기구에서 가장 멀리 떨어져 있는 반대쪽 측벽 바닥 부분(계군 근처)을 선정하였다. 응결 현상, 잠열 구현 모델링을 위하여 제시한 가상 구조를 대상으로 설계 환기량을 분당 0.1회로 지정하였으며 외기 조건은 공기 온도 -25°C , 상대 습도 20%, 내부 공기 온도 27.5°C , 상대습도 65%이다.

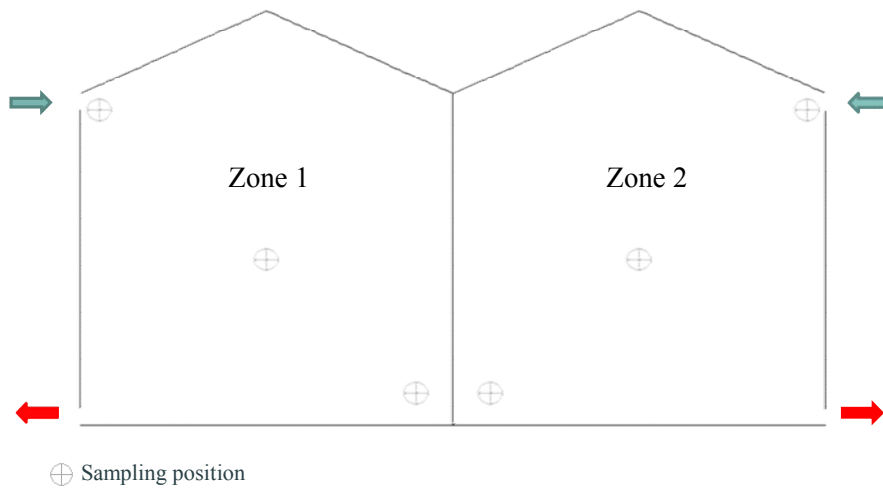


Fig. 3.2.55. 응결현상 유무에 따른 온도장, 유동장 분석을 위한 2D 시뮬레이션
(Zone 1은 응결현상 미 고려, Zone 2는 고려 구조)

먼저, 응결 현상 고려 시, 응결이 발생하는 영역에 대한 산정을 위하여 응결 발생 지역을 도시화 해보면 다음 그림과 같다.

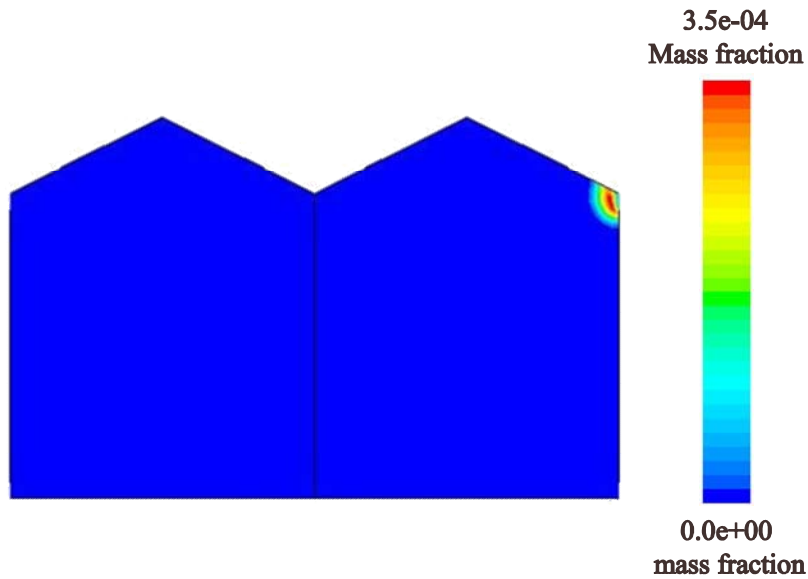


Fig. 3.2.56. 응결 현상 알고리즘 적용에 따른 응결 현상 발생 지역

응결 현상이 발생 한 지점의 경우 Zone 2(응결 현상 고려 구조)의 입기구 근처에 만 국한되는 것으로 나타났다. 따라서 흔히 동절기 계사 내부에서 관측되는 응결된 기류가 계군까지 도달하는 현상의 경우 그 경로에 따라 입기류 전체에 대하여 응결이 발생한 것이 아니라 단지 입기구 인근에서 발생된 응결 기류(기체+액체 상태)가 내부 기류 유동장에 따라 이동하는 현상이라 사료된다.

입기구 근처에서 발생한 응결 현상으로 인하여 입기류의 열에너지 함량, 수분 보유량 등에 기인하여 내부 유동장에서 변화가 관측되는지를 검사하기 위하여 유속 벡터장을 도시화 해보면 다음과 같다.

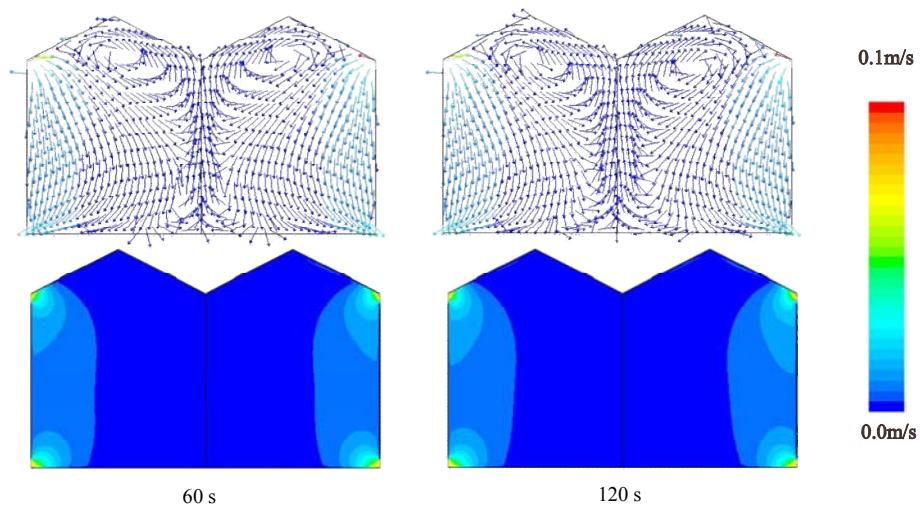


Fig. 3.2.57. 응결 현상 고려 유무에 따른 내부 유동 벡터장 및 유속 분포

내부 유동장을 도시화 해볼 경우 응결 현상 고려 유무에 따른 각각의 구조에서 정성적으로 큰 차이는 발생하지 않는 것으로 판단된다. 보다 정량적인 분석을 제시하기 위하여 각 측정점 별 유속 분포 추이를 시간대 별로 도시화 해보면 다음과 같다.

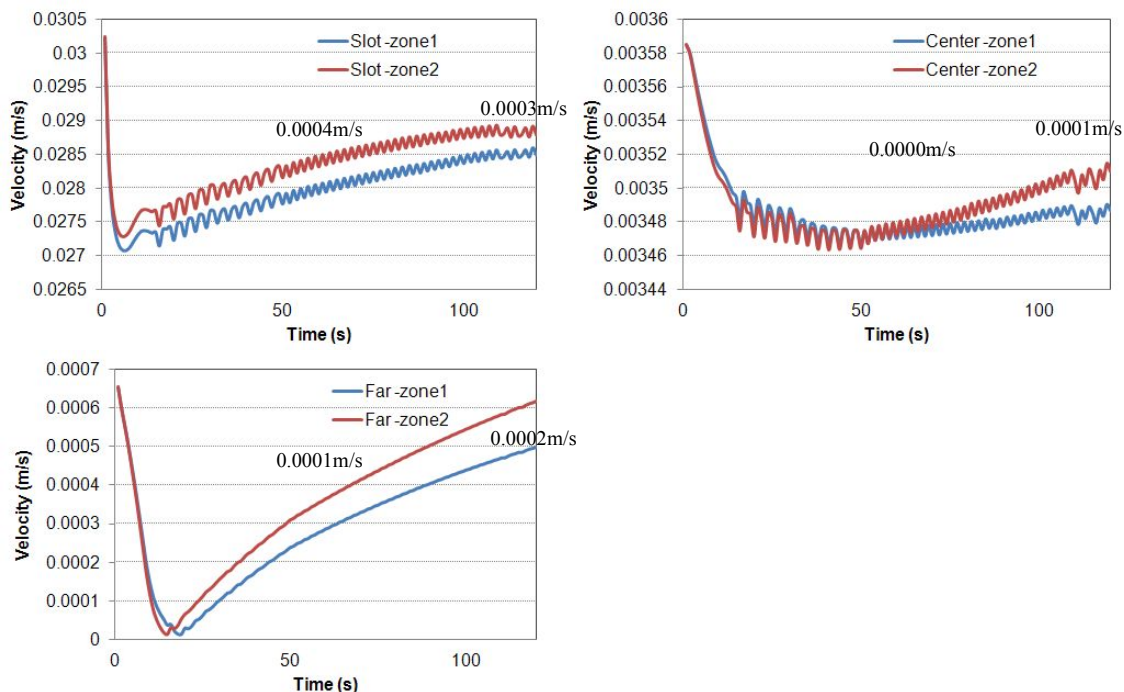


Fig. 3.2.58. 응결 현상 고려 유무에 따른 각 측정점의 시간대 별 유속 분포 추이

환기가 시작된 지 60초, 120초를 기준으로 각 측정점 별 유속 편차를 살펴보면 응결 현상이 관측되었던 입기구 근처의 경우 응결 현상 발생 시, 응결 미고려 구조 대비 60초 시, 약 0.0004m/s, 120초 시, 약 0.0003m/s의 속도 값의 편차를 보여 거의 차이가 존재하지 않는다고 판단할 수 있었다. 그 외 영역에서도 마찬가지로 중앙부의 경우 60초 시에는 편차가 존재하지 않았으며 120초 시에는 약 0.0001m/s 차이로 거의 무시해도 될 만큼의 유속 편차가 존재한다고 판단된다. 계군 근처 역시 마찬가지로 입기구 근처에서 발생한 응결 현상이 내부 유동장에 미치는 영향은 극히 미미하다고 판단된다.

입기구 근처에서 발생한 응결 현상으로 인하여 계사 내부의 온도장 변화 추이를 알아보고자 응결 현상 및 잠열 발현 미 고려(좌측) 구조 및 해당 알고리즘의 적용 구조(우측)의 시간대 별 온도장 변화 추이를 도시화 해볼 때 전체적인 경향 및 온도 값 자체는 거의 유사하게 나타났으나 등온선의 간격 및 시작-끝 지점에서 약간의 차이를 보이고 있는 것으로 나타났다. 정량적인 온도 값 차이 비교를 위하여 2

분 동안 연속 환기 시, 각 측정 지점 및 전체 영역의 평균 온도 분포를 도시화해보면 다음과 같다.

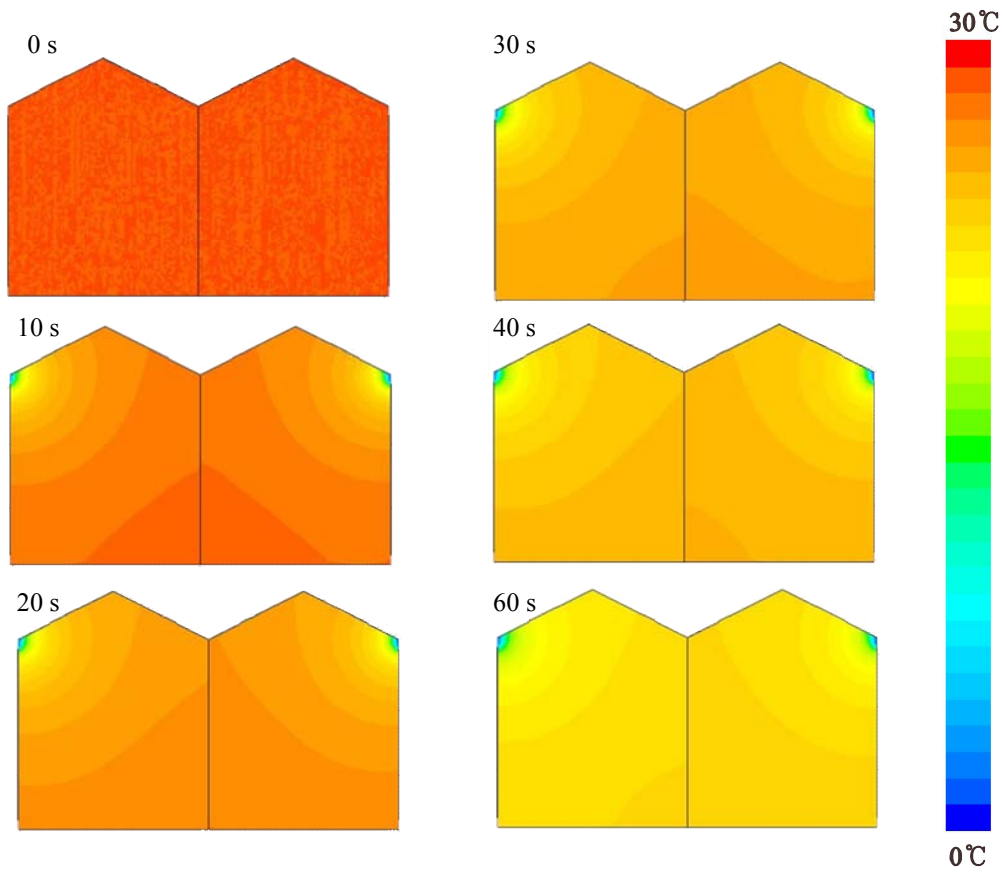


Fig. 3.2.59. 응결현상 유무에 따른 시뮬레이션 결과; 온도장 분포
(Zone 1은 응결현상 미 고려, Zone 2는 응결현상 고려 구조)

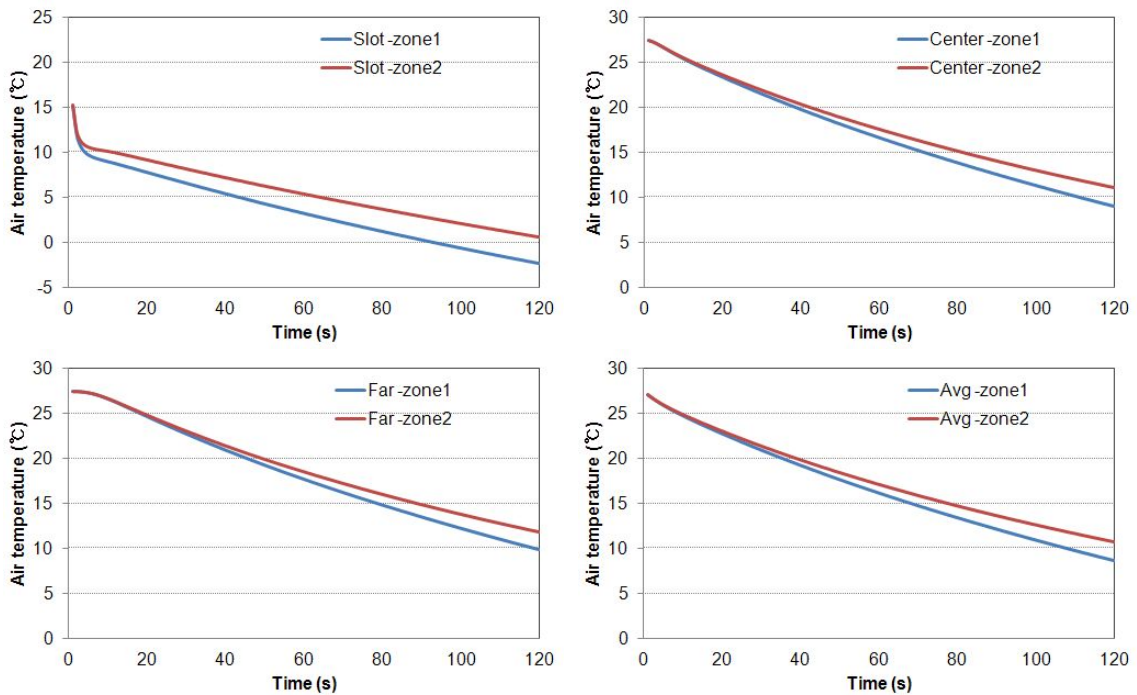


Fig. 3.2.60. 응결 고려 유무에 따른 각 측정 지점 및 평균 온도 변화 추이

시간 대 별 온도 변화 추이를 도시화 해볼 때 입기구 근처 영역의 경우 60초까지는 약 2.1°C, 120초 후에는 2.9°C의 온도 편차를 보여 다소 온도 차가 존재함을 확인할 수 있었으며 중앙 측 영역의 경우 각각 0.9°C, 2.0°C, 입기구 반대쪽 측벽 바닥 인근 (계군 근처)의 경우 각각 0.8°C, 1.9°C의 온도 편차를 보여 입기구로부터 멀리 떨어질수록 그 온도 편차 값이 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 계사 영역 전체에 대한 평균 온도 값의 경우 60초 동안 약 1°C, 120초 동안 2°C 정도의 편차를 보이고 있는 것으로 확인되었다.

응결 및 그로 인한 온도 및 유동 변화를 모의해본 결과 수증기의 응결 현상을 응결 현상 구현 알고리즘 적용 구조에 대하여 입기구 인근에서만 발생하는 것으로 관측되었으며 응결을 고려할 경우 온도 값의 경우 각 측정 지점에서 시간대 별로 약 1~2°C가량 높아지는 것으로 나타났다. 이는 입기구 근처에서의 내부 공기가 포함하고 있는 수증기가 응결됨에 따라 응결 잠열이 주변 공기의 온도를 일정량 가온시킨 결과라고 판단된다. 응결 현상 발생에 따른 내부 유동장 영향 정도를 파악해본 결과 시설 내부 환기 작동에 따라 형성되는 유동 자체는 거의 변화가 없는 것으로 판단되었다.

응결 현상에 대하여 작성한 알고리즘을 3차원의 부피를 갖는 구조에 대하여 적용하였을 때 나타나는 열환경 변화 정도를 관측하기 위하여 다음과 같은 추가 시뮬레

이션을 실시하였다. 계사의 형태는 기존 일반 환기 구조 시스템의 길이 방향 1/5 축소 모델로써 1기의 배기팬을 중심으로 양측의 입기 슬랏이 존재하며 입기 슬랏의 경우 “1구 개방 2구 폐쇄”가 연속적으로 배치되는 형태로 가정하였다. 온도 모니터링 지점은 계군 높이(40cm) 영역에서 9개의 측정점을 균등한 간격으로 배치하였으며 외기 조건은 상대습도 20%, 공기 온도 -25℃로 설정하였으며 내부 공기의 경우 상대습도 65%, 공기 온도 27.5℃이었으며 설계 환기량의 경우 분당 1회 해당 체적의 공기가 0.1회 교환되는 것으로 가정하였다. 1분 동안 환기를 실시하였을 때 각 측정점 별 온도 현황을 파악하면 다음과 같다.

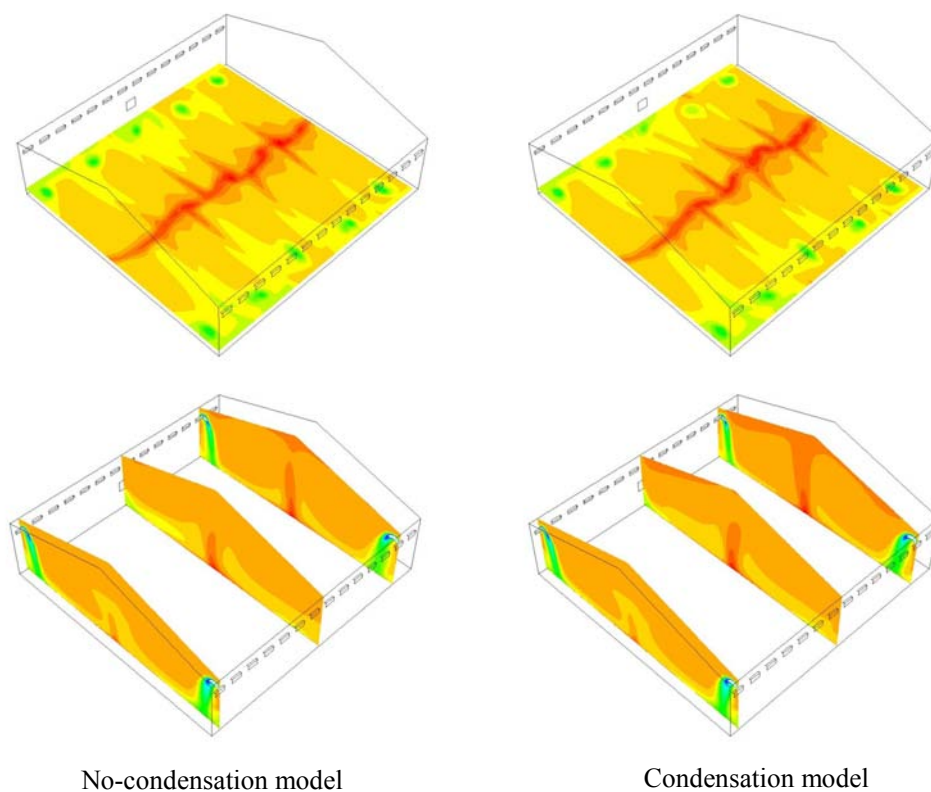


Fig. 3.2.61. 응결 현상 고려 유무에 따른 3차원 시뮬레이션, 환기 시작 1분후 온도 분포

계군 높이 및 환기 단면 별 온도장을 도시해볼 경우, 3차원 체적에 대하여 해당 알고리즘을 적용할 경우 응결 고려 유무에 따른 온도장의 정성적인 차이는 크게 드러나지 않는 것으로 판단되었다. 앞선 2차원 시뮬레이션과 마찬가지로 응결 현상은 입기 슬랏 근처에서만 발생하였으며 이로 인한 온도 값의 차이는 크게 두드러지지 않는 것으로 나타났다. 각 측정점 별 1분 환기 후 온도 값의 경우 다음 표와 같다.

Table 3.2.36. 응결 현상 고려 유무에 따른 각 측정점 별 온도 현황(℃)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Ave.
No condensation	25.9	28.5	25.2	26.1	33.4	27.6	27.3	33.3	26.1	28.2
Condensation	26.0	28.6	26.1	27.2	36.9	29.5	28.3	35.7	28.0	29.6
Diff.	-0.1	-0.1	-0.9	-1.1	-3.4	-2.0	-1.0	-2.4	-1.9	-1.4

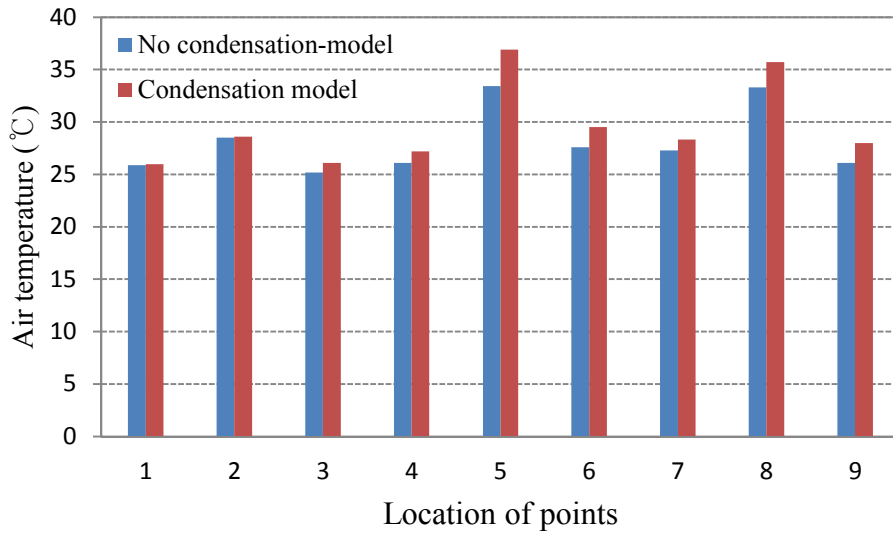


Fig. 3.2.62. 응결 고려 현상 유무에 따른 환기 시작 60초 후 계군 높이 각 측정점 별 온도 분포

2차원 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 3차원 계사 구조에 대한 응결 현상 알고리즘 적용 결과 역시, 응결 현상 구현에 따라 각 측정점 및 평균 온도의 증가 현상을 확인할 수 있었다. 환기가 시작된 지 1분 후 약 1.4℃ 가량 증가하는 것으로 나타났으며 이는 앞선 결과와 마찬가지로 입기구 근처에서 응결 현상이 발생함에 따라 인근 공기가 포함하고 있는 수증기가 응결되고 이에 따라 응결 잠열이 주변 공기의 온도를 일정량 가온 시킨 후, 가온된 공기가 유동을 따라 열에너지가 전이된 결과라고 판단된다.

응결 현상 및 그로 인한 응결 잠열 방출에 따른 열환경 모의 결과 2차원 및 3차원 시뮬레이션 각각의 구조에서 해당 알고리즘을 고려 시, 계군 내 평균 온도가 약 1~2℃ 안팎의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 단 현 연구 단계에서 해당 알고리즘의 적용 여부를 판단하는 데는 한계점이 존재한다. 실제 동절기 현장에서

의 환경 모니터링을 통하여 CFD 시뮬레이션 검증 자료의 확보 이후, 모델 적용 유무에 따른 열환경 및 각종 환경 변수들의 편차를 검사한 후, 적용 여부를 판단해야 할 것으로 판단된다.

제 3 절 국내 일반 강제환기식 육계사 및 HRV 복합 환기 시스템 적용 계사의 운영 주기 도출

육계 사육 일령에 따른 설계 환기량 및 기대 온도 조건을 설계 변수로 하여 그 중 대표적으로 11일령일 경우와 25일령일 경우를 택하여 이에 대한 환경 조건 별 내부 환경 변화를 모의한다. 또한 계군 내 온도 균일성, 적정성, 안정성 정도를 파악하고 HRV 시스템 도입으로 인한 열적 개선 정도를 평가하고 적정 환기 시스템 운영주기를 산출한다.

1. 실험대상 육계사 제원

제 2 절에 수록한 충청북도 음성군 소재 육계사와 동일함.

2. 계군 발열량

제 2절에 수록한 계군 발열량 이론과 동일한 접근 방법을 적용함.

3. 시뮬레이션 조건

연구 대상 지역인 충청북도 음성군에 위치한 육계사 2동에 대하여 전산유체역학 전처리 툴인 GAMBIT을 이용하여 해당 영역에 대한 외부 형상 및 환기구조 등의 세부 구조 설계 및 수치해석을 위한 격자망을 구성을 실시하였다.

HRV 환기 시스템이 설치되어 있는 (a)동의 경우, 설계 도면에 따라 HRV 시스템, 중앙 환기 덕트, 우측 환기 덕트, 추가 배기구 등을 구현하였다. 계산 영역을 구성하는 격자망의 품질 향상 및 경제적인 시뮬레이션 연산 시간(현재 병렬 연산을 통하여 처리할 수 있는 데이터량을 고려) 등을 고려하여 HRV 시스템과 우측 덕트, 중앙 덕트를 연결하는 폭 방향 분기 덕트의 외형은 생략하였으며 이는 시뮬레이션 상 UDF(User defined function) 등과 같은 추가적인 모듈을 활용하여 경계 조건의 재정의의 통하여 실제 운영 방식과 동일하게 작동할 수 있도록 설계하였다. HRV 시스템은 총 3기가 한쪽 측벽 방향에 일정 간격으로 배치되어 있으며 지상으로부터 약 1.5m 높이에서부터 설치 되어 있다. 총 3기 중 출입문에 가장 인근하여 배치된

HRV 시스템의 경우 출입문 인근 측벽에 설치되어 있는 쿨링 패드로 인하여 중앙 측으로 약간 치우쳐 설치되어 있으므로 이는 추가 덕트의 설비를 통하여 간격을 일정하게 조절하고자 하였다. HRV 시스템은 급기 및 배기가 동시에 이루어지며 각 기기 당 3,000CMH의 설계 풍량을 지니고 있으며 배기구는 직경 300mm의 평덕트로 구성되어 있다. HRV 시스템이 설치된 측벽과 반대쪽 측벽 인근, 즉 우측 지붕 하단 및 벽면 인근에 설치되어 있는 덕트의 경우 직경 300mm의 평덕트로써, HRV 시스템으로부터 가열된 외기가 분배되며 시설 내부 중앙 쪽으로 유입구가 일괄적으로 편칭되어 있어 입기류가 중앙으로 유도되게끔 설치되어 있다. 유입구는 지름 50mm의 크기로 400mm 간격으로 한 방향으로 편칭되어 있다. 또한 덕트를 중앙 쪽으로 재배치하였을 때의 열환경 조성 효과를 분석하기 위하여 중앙부에 동일 크기의 평덕트를 배치하였으며 2차년도에 적용한 추가 배기구 외에 기존 일반 강제 환기 시스템과의 조합 운전을 위하여 배기팬 및 입기 슬롯을 배치하였다.

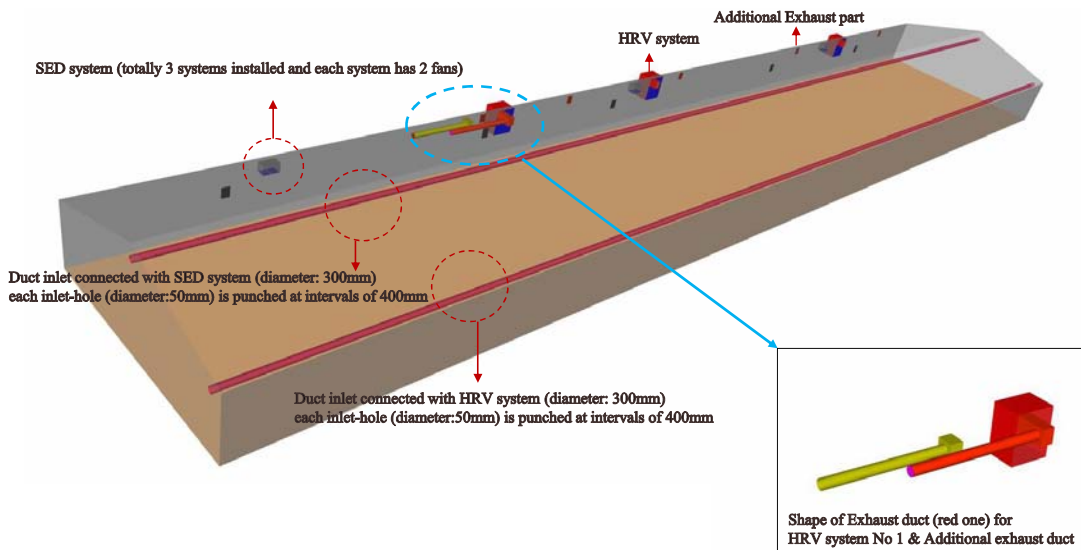


Fig. 3.3.1. GAMBIT을 이용하여 설계한 HRV 설치 육계사 (a) 동 외형 모습

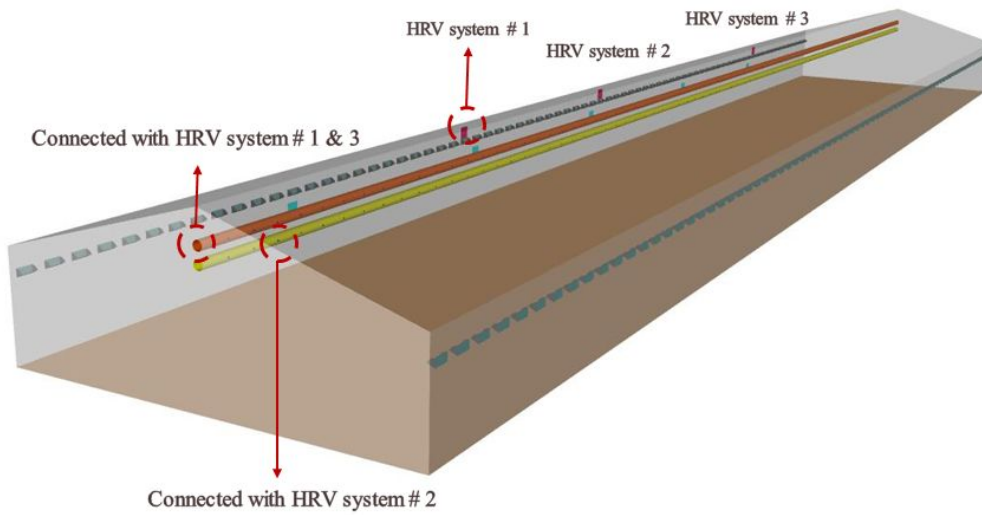


Fig. 3.3.2. GAMBIT을 이용하여 설계한 HRV 설치 육계사 (a) 동; 덕트 중앙부 재배치

기존 일반 강제 환기 시스템 즉 한쪽 측벽에 설치되어 있는 팬을 이용한 음압식 배기, 입기 슬롯을 이용한 입기 방식의 (b)동의 경우, GAMBIT을 이용하여 설계한 육계사의 외형은 다음 그림과 같다. 배기 팬은 높이 600mm, 폭 600mm의 사각 프레임에 맞추어 총 5기가 설치되어 있으며 측벽 상단에 설치되어 있는 슬롯형 입기구 71개 중 10개가 개방되어 있으며 배기팬이 설치되어 있지 않은 반대쪽 측벽의 경우 총 30개의 슬롯형 입기구가 개방되어 있다. 유입구의 각도는 바닥과 평행과 평면으로부터 20도의 각도로 설치되어 입기되는 기류의 방향을 유도하도록 설치되어 있다.

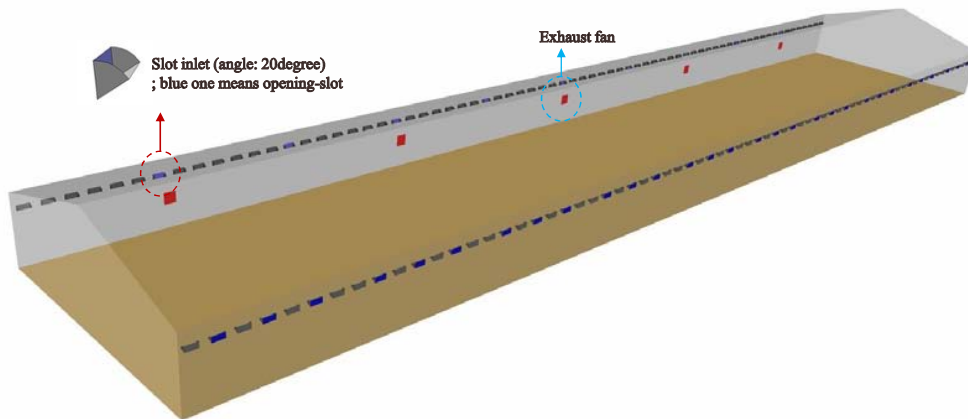


Fig. 3.3.3. GAMBIT을 이용하여 설계한 일반 환기 시스템 이용 (b) 동 외형 모습

격자망 구성의 경우 수치 연산에 있어서 정확도를 요구하는 덕트 및 슬롯 입기구 인근 부근, 배기구 인근에서는 약 1cm 크기로 곡면 등 물리적인 형상을 고려하여 사면체의 조밀한 격자망을 구성하였으며 그 외 영역 즉 지붕 하단 및 바닥 부 등에서는 5~8cm 크기로 육면체 형태의 비교적 성근 격자망을 구성하여 경제적인 연산 수행 시간을 고려하고자 하였다. 구성된 격자망의 총 개수는 약 270만개 정도이다.

적절한 난류 모델의 선택은 전산유체역학을 이용한 유동 및 환경해석에 있어서 해의 수렴성에 가장 큰 영향을 미치는 요인이다. 본 연구에서는 Lee 등(2005)에 의하여 수행된 농업 시설을 대상으로 한 풍동 실험과 PIV(Particle Image velocimeter) 실험 결과 및 전산유체역학 시뮬레이션 결과의 비교 분석 연구를 통하여 그 결과 가장 높은 신뢰도를 보인다고 판단한 RNG $k-\epsilon$ 난류모델을 선택하였다. RNG $k-\epsilon$ 난류모델은 Re-normalization group theory라고 일컬어지는 일종의 통계적 처리를 거쳐 난류 동적 에너지 및 그에 대한 소산율에 대하여 풀이하는 모델로써, 기존의 Standard $k-\epsilon$ 난류 모델과 유사하나 k 와 ϵ 값을 보정하여 거칠고 빠른 유동 및 와류 유동 해석에 있어서 더 높은 해의 정확도를 보유하고 있다.

전산유체역학 시뮬레이션 해석은 비정상 상태에 대하여 각각의 환기 시스템이 운영될 경우 실시간 내부 열환경 변화를 모의하고자 하였으며 이를 위하여 적용한 초기 환경 조건은 다음과 같다. 유입되는 외기의 온도는 영하 25℃, 영하 15℃, 영하 5℃의 동절기 세 가지 대표 조건을 설정하여 환경 조건에 따라 선택하였다. 초기 내부 온도 조건은 일령 별 육계 생육 기대 적정 온도를 바탕으로 각각 11일령 시 27.5℃, 25일령 시 22.5℃로 정의하였다.

바닥에서의 닭 발열량은 앞서 제시한 CIGR(1984) 닭 발열량 공식을 적용하여 해당 일령에 부합되는 닭 개체의 평균 중량, 내부 온도를 바탕으로 단위 면적당 개체당 발열량을 환산하여 계산한 값을 사용하였다. 이때 계산된 닭 발열량은 11일령일 때, 단위 면적당 84.47W, 25일령일 때 219.76W이다. 시뮬레이션에 입력 값으로 사용한 각 경계조건은 다음과 같다(공통).

Table 3.3.1. CFD 시뮬레이션 기본 물성치 및 초기 경계 조건

Parameter		Value	Unit
Density of air		1.225	kg m ⁻³
Viscosity of air		1.86 e-05	kg m ⁻¹ s ⁻¹
Thermal conductivity of air		0.02647	W m ⁻¹ K ⁻¹
Specific heat of air		1006.43	J kg ⁻¹ K ⁻¹
Mass diffusivity of air		2.262 e-05	m ² s ⁻¹
Molecular weight of air		28.966	g mol ⁻¹
Gravitational acceleration of air		9.81	m s ⁻¹
Atmospheric pressure		101.325	kPa
Outside CO ₂ concentration		0.00061(400)	Mass fraction (ppm)
Inside CO ₂ concentration		0.003 (2000)	Mass fraction (ppm)
Heat production of broilers	11days (Ages)	84.47	W
	25days (Ages)	219.76	W
Initial internal air temperature	11days (Ages)	27.5	℃
	25days (Ages)	22.5	℃

환기가 시작될 때 시설 내부 초기 온도는 기대 온도를 따르며, 건물의 지붕 및 측벽, 양 끝단의 벽체 온도는 외기 조건과 동일하게 설정하였다. 벽체는 샌드위치 패널로, Tempcon panel 중 TSCQ-50 (열관류율, 0.440W/m2K) 모델을 적용하였다.

먼저 HRV 시스템 적용 계사에 대하여 덕트 재배치에 따른 열환경 효과 분석을 위하여 기존의 2차년도 도입 모델 즉, 덕트가 우측 상단에 위치하고 중앙부를 향하여 입기되는 구조 및 덕트 중앙 배치에 따라 입기류를 한방향 분기, 양방향 분기 구조에 대하여 환기 시스템이 작동된 지 1분 동안의 내부 열환경을 모니터링 하였다. 이를 토대로 전체 영역 별, 지역 별 열환경 변화 모의를 통하여 가장 열환경 개선 효과가 뛰어난 구조를 도출하고자 하였다.

HRV 시스템 적용 계사 및 일반 강제 환기 시스템 적용 계사에 열환경 해석 및

환기 운영 주기 산출을 위한 설계 조건은 다음 표와 같다. 11일령 환경 조건일 경우, 일반 강제 환기 시스템 적용 계사의 총 배기팬 용량이 30,000 CMH 규모로 설계 환기량인 5,100 CMH를 초과한다. 따라서 배기팬의 on/off 주기 운전을 통하여 목표 환기량을 달성하여야 한다. 환기 운영 주기 산출은 계사 관리자의 운영 지침, 예를 들어 기준 온도 대비 기준 온도±2℃, 기준 온도±3℃ 및 기준 온도±5℃에 대하여 각각 운전 주기를 도출하고자 하였다. 따라서 먼저 각 조건 별 환기 시스템의 연속 운전을 실시한 후 계군 내 전체 평균 온도를 모니터링 하여, 운영 지침에 만족하는 배기팬의 “on time”을 산출하고 목적 환기량 달성을 위한 “off time”을 수계산을 통하여 산출한다. 이 후 계산된 각각의 “off time”에 대하여 해당 시간 적용에 따른 내부 열환경 변화를 시뮬레이션 연산을 통하여 산출한다. “on / off time”에 대한 산출은 다음과 같은 방법을 따른다. 예를 들어 하림에서 제공하는 11일령 연령에 대한 계군의 목적 필요 환기량은 5,100 CMH이나 현 계사의 측벽 배기팬의 총 풍량이 30,000 CMH로 환기 운영 주기를 적용해야 한다. 따라서 목표 환기량 달성을 위하여 다음과 같이 계산한다.

$$\frac{5,100 \text{ CMH}}{30,000 \text{ CMH}} = \frac{\text{ontime}}{\text{ontime} + \text{offtime}} \quad \text{식 (3.3.1.)}$$

만약 “on time”을 시뮬레이션 연산을 통하여 13초로 산출할 경우 상기 식에 대입하면 “off time”을 64초 (실제 63.47초)로 산출할 수 있다. 따라서 이 경우 전체 환기 운영 주기는 13 + 64 = 77초 사이클이 된다.

일반 강제 환기 시스템 적용 계사에 대하여 25일령 조건을 적용할 경우 동일한 방법을 통하여 환기 운영 주기를 산출한다.

HRV 환기 시스템 적용 계사의 경우 HRV 시스템 중 1, 3호기를 가동하여 총 6,000 CMH 규모로 연속 운전을 실시하게 되며 25일령 조건의 경우 HRV 3기의 총 환기량 값이 9,000 CMH로 목표 환기량인 13,600 CMH에 미달되므로 잔여 4,600 CMH를 기존의 일반 강제 환기 시스템 즉 배기 팬 및 입기 슬롯의 조합으로 주기 운전을 조합하여 달성하는 것으로 설계하였다. 이는 2차년도에서 SED 시스템 등을 도입하여 4,600 CMH의 잔여 환기량을 달성하던 것과는 달리, 기존 일반 강제 환기 시스템과의 조합을 통하여 달성하고자 하였다. 2차년도 연구 내용 주에는 25일령 기준 환기 운영 방식의 경우 9,000CMH 규모의 풍량을 HRV 시스템이 담당하고 잉여 풍량을 SED 시스템을 내부 순환용에서 급기구로 전환하여 사용하는 방식이었으나 계사 내부에서 발생하는 각종 사료 입자, 분변, 털 등과 같은 먼지의 침착, 그로

인한 유지 관리 문제가 발생함에 따라 계획을 변경하여 잉여 풍량을 기존의 일반 강제 환기 시스템과의 조합을 통하여 해결하는 방식으로 계획이 변경되었다.

Table 3.3.2. 환경 조건에 따른 설계 환기량 및 운전 현황

실제 운영 현황을 고려한 일반 환기 및 HRV 시스템 적용에 따른 내부 환경 평가			
일령	환기시스템 현황	설계 환기량, CMH	운전 방식
11일령	일반 환기 시스템	30,000	주기 운전*
	HRV 환기 시스템	6,000	연속 운전 (1, 3호기)
25일령	일반 환기 시스템	30,000	주기 운전*
	HRV 환기 시스템	9,000 + 4,600(일반)	연속운전 +주기 운전*

HRV 시스템은 계사 외부로 배출되는 폐열을 회수하여 내부로 유입되는 신선한 외기를 가온한 후 재투입하는 방식으로 운영되며, 이 때 열 효율은 계사 내·외부 온도 차의 약 80% 효율을 바탕으로 외기 가운데 사용된다고 보고된 바 있다. “기존 일반 환기 시스템 대비 HRV 시스템 적용에 따른 내부 환경 평가” 항목 분석의 경우 HRV 시스템 운영 시, 기기 작동에 따른 자체 모터의 가열로 인하여 20℃의 일정한 온도 값을 갖는 외기가 유입된다고 가정하였다. 그러나 이후 “실제 운영 현황을 고려한 일반 환기 및 HRV 시스템 적용에 따른 내부 환경 평가” 분석에 있어서는 동절기 상황을 고려하여 당초 HRV 시스템의 가온 효율로 보고된 계사 내·외부 온도차의 80% 효율로 외기가 가온 되는 것으로 설정하였다. 이때 계사 내부로 유입되는 외기의 온도는 다음 식으로 구성된다.

$$T_i - (T_i + T_o) \times 0.8 = T_{duct} \quad \text{식 (3.3.2.)}$$

여기서, T_{duct} 는 HRV 시스템을 통하여 가온되어 덕트를 통하여 유입되는 외기의 온도, ℃, T_i 는 계사 내부 평균 온도, ℃, T_o 는 계사 외부 평균 온도, ℃이다.

4. HRV 복합 환기 시스템 적용 계사의 계군 내 적정 열환경 조성을 위한 환경 조건 별 운영 주기 도출

가. HRV 환기 시스템 덕트 재배치에 따른 열환경 평가

HRV 시스템을 적용 계사에 대하여 2차년도 현장에 적용한 측벽 인근 설치 및 계사 중앙을 향한 입기 천공 구조에 대하여 덕트를 중앙부로 재배치하였을 때 따른 내부 열환경 평가를 실시하였다. 재배치된 덕트는 중앙부에 상하로 2기를 설치하였으며 각각 배기팬의 반대 측벽 방향을 향해 배기되는 단방향 입기, 덕트 양측에서 가온된 외기가 공급되는 양방향 입기 구조에 대한 내부 열환경 평가 결과는 다음과 같다. 계군은 11일령으로 가정하였으며 외기 온도는 -15°C , 이때 요구되는 적정 온도 27.5°C 를 초기 조건으로 가정한 후, HRV 시스템을 연속으로 300초 동안 운전할 때 각 구조 별 계군 내 평균 온도 추이는 다음 그래프와 같다.

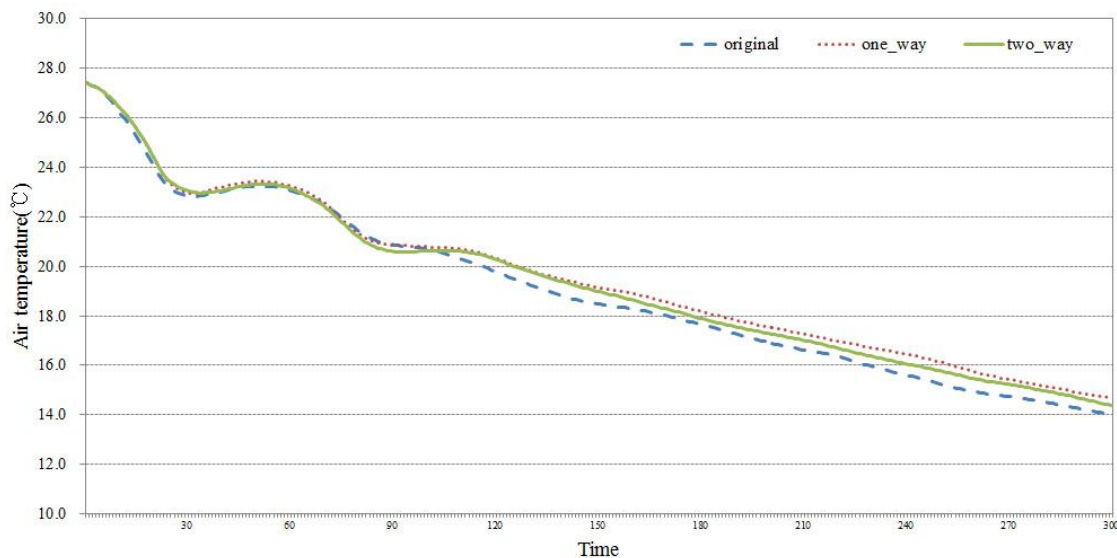


Fig. 3.3.4. 덕트 배치에 따른 11일령 조건, HRV 시스템 작동 시 계군 내 열환경 추이

계군 내 평균 온도의 경우 환기 시스템이 작동된 후 300초 이후 기존의 2차년도 덕트 배치 시스템의 경우 약 14.0°C , 단방향 입기 구조의 경우 14.7°C , 양방향 입기 구조의 경우 14.4°C 로 단방향>양방향>2차년도 구조 순으로 온도 분포가 형성되었으나 그 차이는 두드러지지 않았다. 지역적인 열환경 분포를 모니터링 해본 결과 지역적 편차도 그리 크지 않았으나 단방향 입기를 적용할 때 열환경적으로 보다 우수한 것으로 나타났으며 균일성 측면에서도 큰 차이를 보이지는 않았다. 다만 세 구조 모두 환기 시스템이 가동된 후 50~60초 이후부터 열적 균일성이 다소 하락하기 시작하는 것으로 나타났다. 또한 계군 내 평균온도를 토대로 적정성을 판단할

때 유입되는 외기에 따른 계군 내 온도 하락으로 인하여 일정 시간 이후에서부터는 난방기를 가동하여 추가 열원의 공급을 통하여 운영 조건에 만족하는 목표 온도 조건을 달성해야 될 것으로 판단된다. 예를 들어, $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 를 운영 조건으로 적용할 경우 2차년도 덕트 구조, 덕트 중앙 단방향 입기 조건, 양방향 입기 조건의 경우 모두 10~20초 사이에 추가 열원의 공급이 필요한 것으로 나타났다.

세 가지 덕트 배치 구조에 대한 내부 열환경 평가 결과, 계군 온도에 있어서 세 구조간의 큰 열환경 차이는 보이지 않았으나 약간의 온도 상승을 보인 덕트 중앙 배치, 단방향 입기 구조가 동절기 난방 운영 및 추가 열원 공급에 따른 난방 비용 등을 고려할 때 다소 유리할 것으로 판단되었다.

Table 3.3.3. 11일령 조건 시 외기 온도 -15°C , HRV 환기 시스템 적용 계사, 2차년도 현장 적용 덕트 배치 시 계군에서의 시간대 별 최고, 최저, 편차, 평균 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location ($^{\circ}\text{C}$)				
	Max.	Min.	Diff.	Ave.	STDEV.
10	28.2	25.2	2.9	26.4	1.1
20	26.8	22.7	4.1	24.2	1.5
30	23.6	22.2	1.4	22.9	0.4
40	23.4	22.6	0.8	23.0	0.3
50	23.7	22.8	0.9	23.2	0.3
60	24.0	22.3	1.7	23.1	0.6
120	20.8	18.4	2.4	19.8	0.7
180	18.9	15.6	3.3	17.7	1.1
240	17.4	14.0	3.4	15.6	1.2
300	16.4	12.2	4.2	14.0	1.3

Table 3.3.4. 11일령 조건 시 외기 온도 - 15℃, HRV 환기 시스템 적용 계사, 덕트 중앙 배치, 단방향 입기 시 계군에서의 시간대 별 최고, 최저, 편차, 평균 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)				
	Max.	Min.	Diff.	Ave.	STDEV.
10	28.1	25.5	2.6	26.5	1.0
20	27.3	22.9	4.4	24.5	1.7
30	23.8	22.1	1.7	23.0	0.6
40	23.7	22.6	1.1	23.2	0.4
50	24.1	22.5	1.6	23.4	0.5
60	24.3	21.6	2.7	23.3	0.8
120	22.1	17.6	4.6	20.4	1.3
180	20.4	15.5	4.8	18.2	1.6
240	18.9	14.3	4.6	16.5	1.6
300	17.3	12.2	5.0	14.7	1.7

Table 3.3.5. 11일령 조건 시 외기 온도 - 15℃, HRV 환기 시스템 적용 계사, 덕트 중앙 배치, 양방향 입기 시 계군에서의 시간대 별 최고, 최저, 편차, 평균 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)				
	Max.	Min.	Diff.	Ave.	STDEV.
10	28.1	25.5	2.5	26.5	1.0
20	27.3	22.9	4.4	24.5	1.7
30	23.9	22.3	1.6	23.1	0.5
40	23.6	22.3	1.3	23.1	0.4
50	24.0	22.4	1.6	23.3	0.5
60	24.2	21.6	2.7	23.2	0.8
120	22.0	17.3	4.7	20.3	1.4
180	19.8	15.5	4.3	17.9	1.4
240	18.2	13.8	4.3	16.1	1.6
300	16.4	12.0	4.4	14.4	1.6

나. 11일령 환경 조건 시 HRV 환기 시스템 연속 운전에 따른 열환경 평가

동절기 육계 11일령 기준, HRV 시스템 적용 계사에 대한 환기 시스템 가동에 따른 내부 열환경 변화에 대하여 시뮬레이션 모의를 실시하였다. 덕트 구조 재배치에 따른 열환경 평가 결과, 큰 차이는 보이지 않았으나 덕트를 중앙부에 상·하로 배치하고 배기팬 반대 방향의 측벽을 향하여 단방향 입기를 하는 구조가 열환경에서 다소 유리하다고 판단되어 해당 구조에 대한 모의를 실시하였다. 11일령 조건의 경우 적정 환경 조성을 위한 요구 환기량이 5,100 CMH 규모로써 HRV 2기를 가동하여 6,000CMH 규모의 환기를 적용할 때 연속 운전을 통하여 요구량 이상의 외기를 공급함으로써 주기 산정은 불필요하다. 따라서 HRV 시스템 1호 및 3호를 연속으로 운전하는 상황을 고려하여 3가지 외기 조건 -5, -15, -25℃에 대한 계군 내에서의 열환경 변화를 시뮬레이션을 통하여 모의하였다.

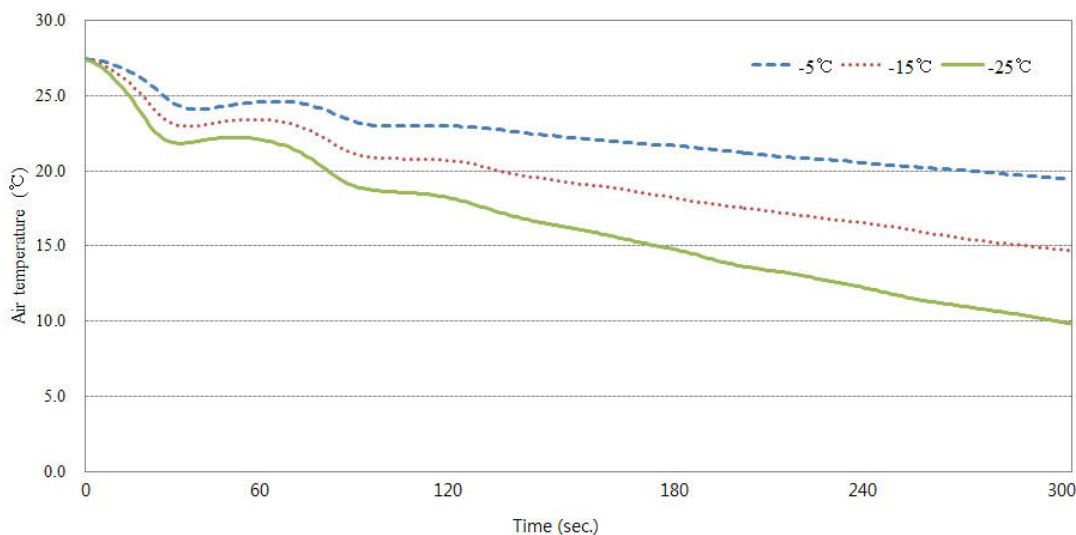


Fig. 3.3.5. 11일령 조건 시 외기 조건에 따른 HRV 적용 계사 계군 내 열환경 분포 추이

11일령 환경 조건일 경우 요구 환기량에 따라 HRV 시스템의 작동이 연속적으로 이루어지므로 계사 내부에서 외부로 배출되는 폐열을 회수하여 다시 외기를 가온하여 지붕 하단 중앙 측에 존재하는 각각의 덕트를 통하여 공급된다. 이때 형성되는 계군 내에서의 평균 온도 모니터링을 토대로 각각의 계사 운영 기준에 따른 적정 열환경 조성을 위한 난방기의 추가 가동 추천 시간은 다음 표와 같다. 예를 들어 적정온도 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 를 운영 조건으로 설정할 경우 외기 온도가 -5°C 시, HRV 시스템이 작동된 후 약 27초 이후에 내부 열회복을 위한 온풍기 등의 추가적인 열원 공급이

이루어져야 하며 외기온이 -15℃일 경우 20초, -25℃일 때 16초 이후가 추천되는 것으로 나타났다.

Table 3.3.6. 11일령 조건 시 HRV 환기 시스템 적용 계사의 운영 기준에 따른 난방기 가동 추천 시간 (HRV 환기 시스템이 작동된 시점 이후) (Unit: sec.)

	±2℃	±3℃	±5℃
-5℃	22	27	134
-15℃	16	20	71
-25℃	12	16	22

Table 3.3.7. 외기 조건 -5℃, 환기 시스템을 연속 운전할 경우 영역별 온도 분포
(Unit: ℃)

time sec.	location of plane									ave.	max	min	diff.
	1-1	1-2	1-3	2-1	...	4-3	5-1	5-2	5-3				
1	27.4	27.5	27.4	27.4	...	27.4	27.4	27.5	27.4	27.4	27.5	27.4	0.2
2	27.3	27.5	27.3	27.4	...	27.4	27.3	27.5	27.3	27.4	27.6	27.3	0.3
3	27.2	27.5	27.2	27.3	...	27.3	27.2	27.6	27.2	27.4	27.6	27.2	0.4
4	27.1	27.6	27.1	27.3	...	27.3	27.2	27.6	27.2	27.4	27.7	27.1	0.6
5	27.0	27.6	27.0	27.2	...	27.2	27.1	27.6	27.1	27.3	27.7	27.0	0.7
6	26.9	27.6	26.9	27.1	...	27.1	27.0	27.6	27.0	27.3	27.8	26.9	0.9
7	26.8	27.6	26.8	27.1	...	27.0	26.9	27.7	26.8	27.2	27.9	26.8	1.1
8	26.7	27.6	26.6	27.0	...	26.9	26.7	27.7	26.7	27.2	27.9	26.6	1.3
9	26.5	27.6	26.5	26.9	...	26.8	26.6	27.7	26.5	27.1	28.0	26.5	1.5
10	26.3	27.6	26.3	26.8	...	26.7	26.4	27.7	26.4	27.0	28.0	26.3	1.7
.
.
.
31	23.8	25.0	23.4	24.2	...	23.6	23.8	24.8	23.3	24.2	25.1	23.3	1.8
32	23.8	24.9	23.4	24.2	...	23.6	23.8	24.7	23.3	24.1	25.0	23.3	1.8
33	23.7	24.9	23.4	24.2	...	23.6	23.8	24.7	23.3	24.1	24.9	23.3	1.7
34	23.7	24.8	23.4	24.2	...	23.7	23.8	24.6	23.3	24.1	24.9	23.3	1.6
35	23.7	24.8	23.5	24.2	...	23.7	23.8	24.5	23.3	24.1	24.8	23.3	1.5
.
.
.
61	24.2	25.1	24.2	24.8	...	24.6	24.1	24.1	23.9	24.6	25.3	23.9	1.5
62	24.2	25.1	24.2	24.8	...	24.5	24.1	24.1	23.9	24.6	25.4	23.9	1.5
63	24.1	25.1	24.2	24.7	...	24.5	24.0	24.0	23.8	24.6	25.4	23.8	1.5
64	24.1	25.0	24.1	24.7	...	24.5	24.0	23.9	23.8	24.6	25.4	23.8	1.6
65	24.0	25.0	24.1	24.7	...	24.4	24.0	23.9	23.8	24.5	25.4	23.8	1.6
.
.
.
300	17.8	19.2	18.4	20.0	...	19.8	17.3	17.9	17.8	19.5	21.6	17.3	4.3

Table 3.3.8. 외기 조건 -15℃, 환기 시스템을 연속 운전할 경우 영역별 온도 분포
(Unit: ℃)

time sec.	location of plane									ave.	max	min	diff.
	1-1	1-2	1-3	2-1	...	4-3	5-1	5-2	5-3				
1	27.3	27.5	27.3	27.4	...	27.4	27.3	27.5	27.3	27.4	27.5	27.3	0.2
2	27.2	27.5	27.2	27.3	...	27.3	27.2	27.5	27.2	27.3	27.6	27.2	0.4
3	27.1	27.5	27.1	27.2	...	27.2	27.1	27.5	27.1	27.3	27.6	27.1	0.6
4	26.9	27.5	26.9	27.1	...	27.1	26.9	27.5	26.9	27.2	27.7	26.9	0.8
5	26.7	27.5	26.7	27.0	...	27.0	26.8	27.6	26.8	27.1	27.8	26.7	1.0
6	26.5	27.5	26.5	26.8	...	26.8	26.6	27.6	26.6	27.0	27.8	26.5	1.3
7	26.3	27.5	26.3	26.7	...	26.7	26.4	27.5	26.4	26.9	27.9	26.3	1.6
8	26.1	27.4	26.1	26.5	...	26.5	26.2	27.5	26.1	26.8	27.9	26.1	1.9
9	25.8	27.4	25.8	26.3	...	26.3	25.9	27.5	25.9	26.7	28.0	25.8	2.2
10	25.5	27.4	25.5	26.1	...	26.1	25.6	27.5	25.6	26.5	28.1	25.5	2.6
.
.
.
31	22.6	23.5	22.3	23.2	...	22.7	22.6	23.2	22.1	23.0	23.7	22.1	1.6
32	22.6	23.5	22.3	23.2	...	22.7	22.6	23.1	22.2	23.0	23.6	22.2	1.5
33	22.6	23.4	22.4	23.2	...	22.8	22.6	23.0	22.2	23.0	23.6	22.2	1.4
34	22.6	23.4	22.5	23.2	...	22.9	22.6	22.9	22.3	23.0	23.5	22.3	1.3
35	22.6	23.3	22.6	23.2	...	23.0	22.6	22.8	22.3	23.0	23.5	22.3	1.2
.
.
.
61	22.6	23.4	22.7	23.6	...	23.6	22.1	21.5	22.3	23.2	24.3	21.5	2.8
62	22.6	23.3	22.6	23.5	...	23.6	22.0	21.4	22.2	23.2	24.3	21.4	2.9
63	22.5	23.3	22.5	23.5	...	23.5	21.9	21.3	22.1	23.1	24.3	21.3	3.0
64	22.4	23.3	22.4	23.4	...	23.5	21.8	21.2	22.1	23.1	24.3	21.2	3.1
65	22.3	23.2	22.3	23.4	...	23.4	21.7	21.1	22.0	23.0	24.2	21.1	3.2
.
.
.
300	12.6	13.8	13.4	15.3	...	15.4	12.4	12.2	12.8	14.7	17.3	12.2	5.0

Table 3.3.9. 외기 조건 -25℃, 환기 시스템을 연속 운전할 경우 영역별 온도 분포
(Unit: ℃)

time sec.	location of plane									ave.	max	min	diff.
	1-1	1-2	1-3	2-1	...	4-3	5-1	5-2	5-3				
1	27.3	27.5	27.3	27.3	...	27.3	27.3	27.5	27.3	27.4	27.5	27.3	0.3
2	27.1	27.5	27.1	27.2	...	27.2	27.1	27.5	27.1	27.3	27.6	27.1	0.5
3	26.9	27.5	26.9	27.1	...	27.1	26.9	27.5	26.9	27.2	27.6	26.9	0.8
4	26.7	27.4	26.7	26.9	...	26.9	26.7	27.5	26.7	27.1	27.7	26.7	1.0
5	26.4	27.4	26.4	26.7	...	26.7	26.5	27.5	26.5	26.9	27.8	26.4	1.4
6	26.1	27.4	26.1	26.5	...	26.5	26.2	27.5	26.2	26.8	27.8	26.1	1.7
7	25.8	27.3	25.8	26.3	...	26.3	25.9	27.4	25.8	26.6	27.9	25.8	2.1
8	25.4	27.2	25.4	26.0	...	26.0	25.5	27.4	25.5	26.4	27.9	25.4	2.5
9	25.0	27.2	25.0	25.8	...	25.7	25.2	27.3	25.1	26.2	28.0	25.0	3.0
10	24.7	27.1	24.6	25.5	...	25.4	24.8	27.2	24.7	26.0	28.1	24.6	3.4
.
.
.
31	21.4	22.1	21.3	22.2	...	21.9	21.4	21.5	21.1	21.8	22.4	21.1	1.4
32	21.4	22.1	21.4	22.2	...	22.0	21.4	21.4	21.1	21.9	22.4	21.1	1.3
33	21.5	22.0	21.5	22.2	...	22.1	21.4	21.3	21.2	21.9	22.4	21.2	1.2
34	21.5	22.0	21.6	22.2	...	22.2	21.4	21.2	21.2	21.9	22.4	21.2	1.2
35	21.5	22.0	21.7	22.3	...	22.3	21.4	21.2	21.3	22.0	22.4	21.2	1.2
.
.
.
61	20.9	21.4	20.9	22.2	...	22.7	19.7	18.7	20.1	21.7	23.2	18.7	4.4
62	20.8	21.3	20.8	22.1	...	22.7	19.6	18.6	20.0	21.6	23.2	18.6	4.6
63	20.7	21.2	20.6	22.0	...	22.7	19.5	18.4	19.9	21.5	23.1	18.4	4.7
64	20.5	21.2	20.4	21.9	...	22.6	19.3	18.3	19.7	21.4	23.1	18.3	4.9
65	20.4	21.1	20.2	21.7	...	22.5	19.2	18.1	19.6	21.3	23.1	18.1	5.0
.
.
.
300	8.4	9.6	8.5	11.2	...	10.2	7.5	6.1	6.9	9.8	12.4	6.1	6.3

외기 온도가 -5℃일 때 각 운영 조건에 따른 HRV 환기 시스템 연속 운전 시 추가 열원의 공급이 권장되는 시기 시, 지역별 온도 분포는 다음과 같다.

Table 3.3.10. 11일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 각 운영기준에 따른 HRV 환기 시스템 연속 운전 시 추가 열원의 공급이 권장되는 시기 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (°C)						
22 (±2℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	24.1	24.7	24.5	24.6	24.2	28.1	24.0
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	27.0	28.1	28.0	28.0	27.0	25.4	4.0
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
24.1	24.5	24.5	24.5	24.0	1.6		
27 (±3℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	23.9	24.4	24.2	24.3	24.0	25.9	23.6
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	25.5	25.9	25.8	25.8	25.4	24.5	2.3
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
23.7	24.0	24.0	24.0	23.6	0.8		
134 (±5℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	21.4	23.4	22.1	22.3	21.1	24.0	20.9
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	22.6	24.0	23.9	24.0	20.9	22.5	3.1
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
21.7	23.0	22.9	22.8	21.8	1.0		

±2℃ 운영 지침이 반영될 경우 HRV 환기 시스템이 작동된 후 22초 이후 온풍기 등과 같은 추가 열원의 공급이 필요하며 이때 추가 열원에 대한 공급이 시작되기 직전에 형성되는 지역별 온도 분포를 검토해보면, 최고 온도 값 및 최저 온도 값을 갖는 영역의 편차가 약 4.0℃로 나타났다. 이는 길이 방향에 대하여 계군 중앙부에서 27~28℃의 높은 온도 값을 갖는 것에 비하여 양 측벽 인근에서 상대적으로 낮은 온도 분포를 띄기 때문인데 이는 벽체에서의 전도 열손실에 의한 것으로 판단된다. 따라서 계사 운영에 있어서 해당 운영 지침을 반영할 경우 온풍기의 방향을 양 측벽을 향해 배치하는 것이 좀더 균일한 열환경 조성을 위해 유리하게 작용될 것으로 판단된다. ±3℃, ±5℃ 운영 지침 적용 시, 온풍기 가동 전 지역별 열환경 분포를 검토해보면 ±2℃ 운영 조건과 비교하여 최고-최저 온도간의 편차 및 균일성이 상

대적으로 우수한 것으로 나타났다.

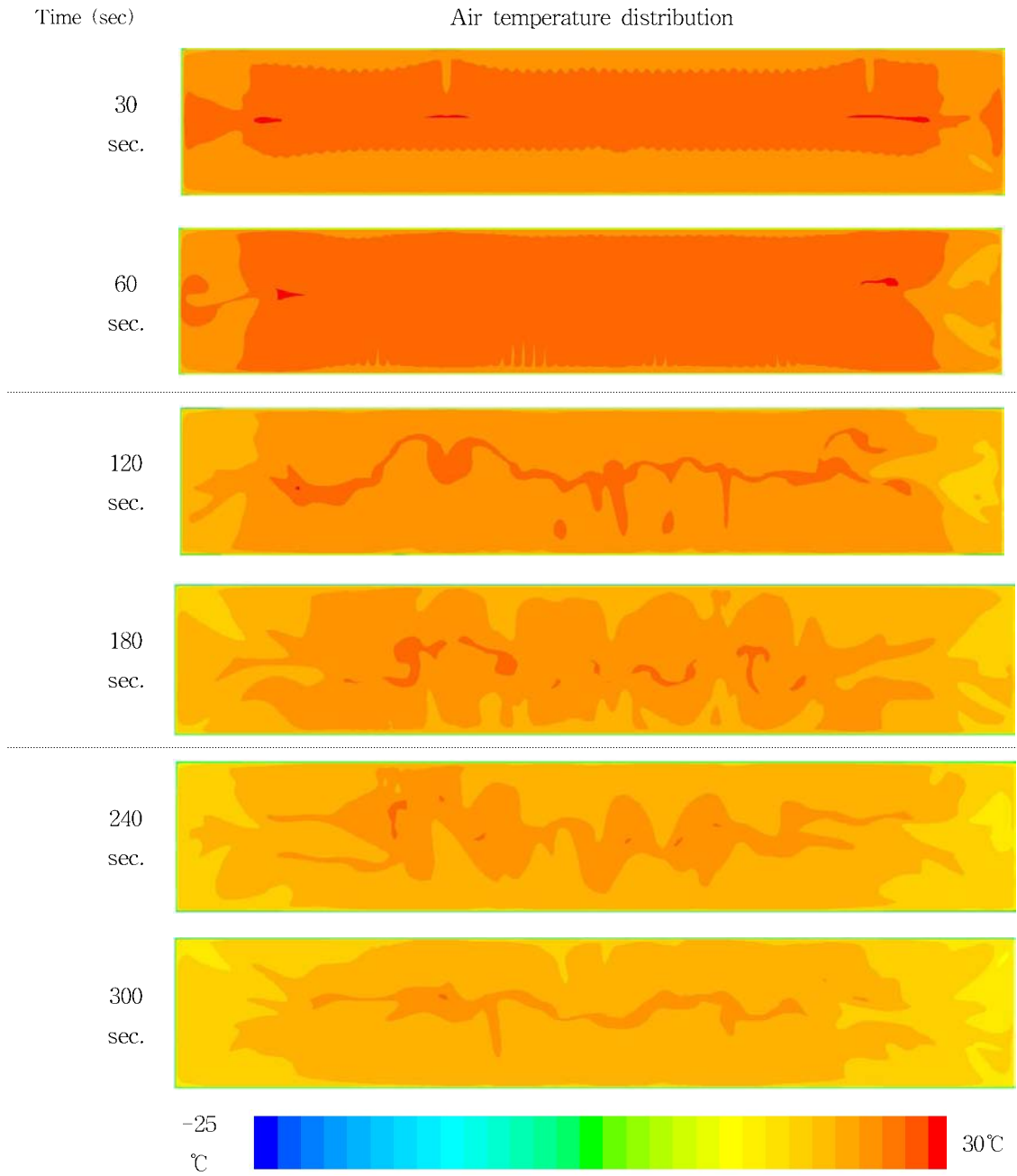


Fig. 3.3.6. 외기 온도 -5°C, 11일령 조건일 때 복합 환기 시스템 작동 후 시간에 따른 계군 높이(40cm) 열환경 분포

외기 온도가 -15°C일 때 각 운영 조건에 따른 HRV 환기 시스템 연속 운전 시 추가 열원의 공급이 권장되는 시기 시, 지역별 온도 분포는 다음과 같다.

Table 3.3.11. 11일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 각 운영기준에 따른 HRV 환기 시스템 연속 운전 시 추가 열원의 공급이 권장되는 시기 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (°C)						
16 (±2°C)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	23.7	24.5	24.4	24.4	23.8	28.6	23.6
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	27.3	28.6	28.6	28.6	27.3	25.4	5.0
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
23.7	24.3	24.3	24.3	23.6	2.0		
20 (±3°C)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	23.0	23.7	23.6	23.6	23.1	27.3	22.9
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	26.1	27.3	27.2	27.2	26.1	24.5	4.4
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
23.0	23.5	23.5	23.5	22.9	1.7		
71 (±5°C)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	21.7	22.8	22.6	22.7	21.0	24.1	20.4
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	22.9	24.1	24.0	24.0	20.4	22.5	3.7
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
21.5	22.8	22.6	22.6	21.5	1.1		

외기 조건이 -15℃일 경우, -5℃ 환경 조건에 비하여 폭방향에 따른 온도 편차가 다소 크게 나타났다. 운영 지침이 ±2℃일 경우 추가 열원의 공급이 필요한 환기 시스템이 작동된 후 16초 시, 환기 팬 인근의 plane n-1 계열의 지역 간 평균 온도는 약 24.2℃, 다른 측벽 인근 영역인 plane n-3 계열의 지역 간 평균 온도는 약 24.0℃로 28.1℃로 길이방향 가운데 영역에 비하여 각각 약 14%, 15% 낮은 온도 분포를 띄는 것으로 나타났다. 따라서 추가적인 열원의 공급은 양쪽 측벽 인근을 향하여 배기 하는 것이 균일한 열환경 구성에 유리할 것으로 판단된다. 운영 지침 조건이 ±3℃, ±5℃로 증가할수록 영역 간 온도 편차는 감소하고 균일성은 다소 증가하는 것으로 나타났으나 여전히 벽체 인근 영역에서 낮은 온도 값을 보이고 있으며 이는 계사 벽체에서의 전도 열손실에 기인한 결과로 판단된다. 따라서 추가적인 열원의 공급이 벽체 인근을 향하여 배치하거나 벽체 인근의 보온재 보강 등을 통한 열손실을 저하를 위한 기초 공사 등이 필요할 것이라 판단된다.

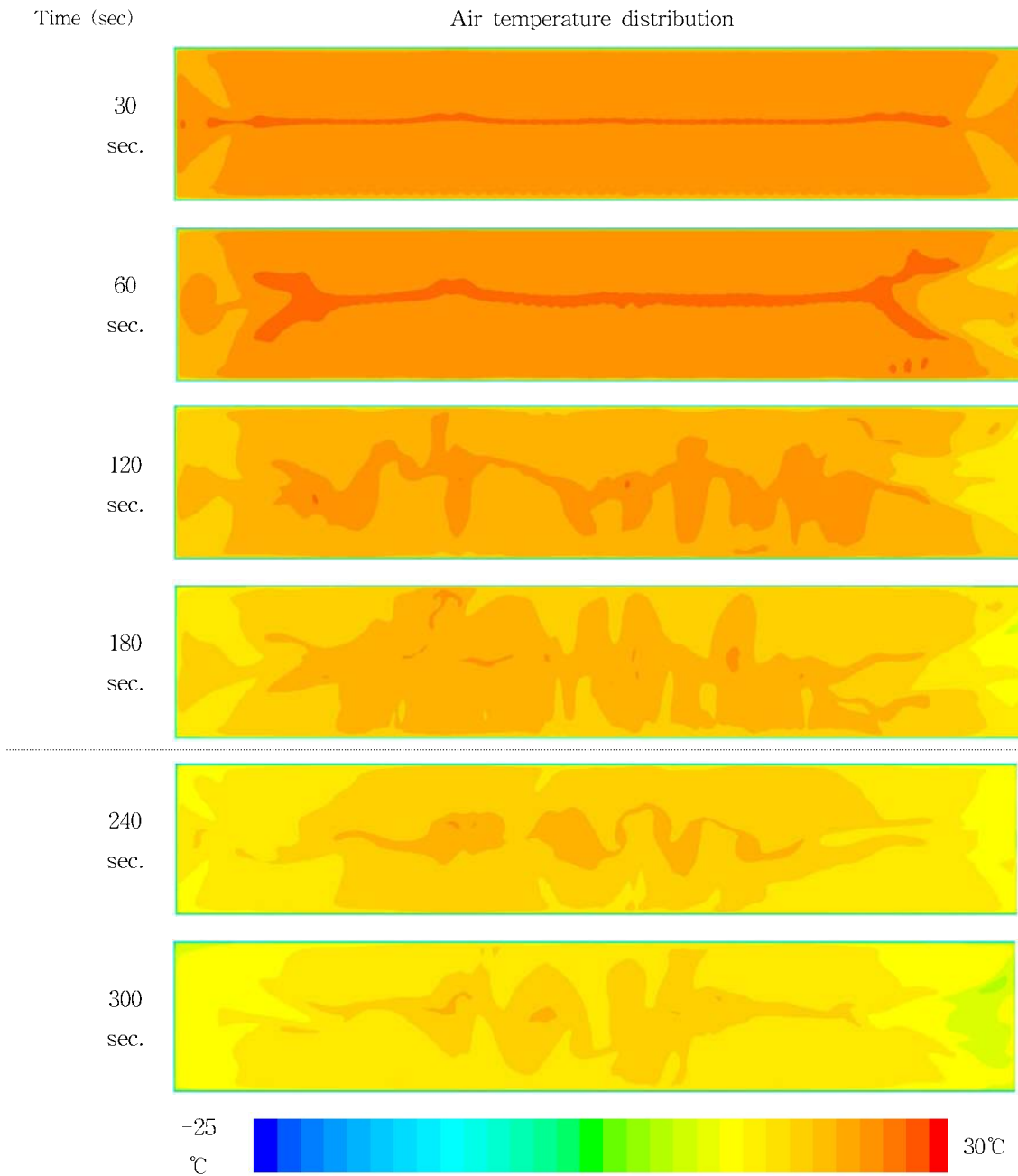


Fig. 3.3.7. 외기 온도 -15°C , 11일령 조건일 때 운영 지침 별 환기 시스템 작동 후 추가 열원 공급이 필요한 시각/환기 시스템 작동 후 300초 이후 계군 높이(40cm) 열환경 분포

마찬가지로 외기 조건이 -25°C 일 경우, 각 운영 지침 별 추가 열원 공급이 권장 되는 시각에서의 지역별 열환경 분포는 다음과 같다.

Table 3.3.12. 11일령 조건 시 외기 온도 -25℃, 각 운영기준에 따른 HRV 환기 시스템 연속 운전 시 추가 열원의 공급이 권장되는 시기 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
12 (±2℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	23.9	24.8	24.7	24.7	24.0	28.3	23.8
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	27.0	28.3	28.3	28.3	27.2	25.5	4.5
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
23.8	24.6	24.6	24.6	23.8	1.8		
16 (±3℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	22.4	23.3	23.1	23.2	22.5	28.1	22.3
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	26.5	28.1	28.0	28.0	26.5	24.4	5.8
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
22.4	23.1	23.1	23.1	22.3	2.3		
22 (±5℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	21.7	22.4	22.3	22.3	21.7	24.0	21.4
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	23.5	24.0	23.9	23.9	23.3	22.5	2.7
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
21.5	22.0	22.0	22.0	21.4	0.9		

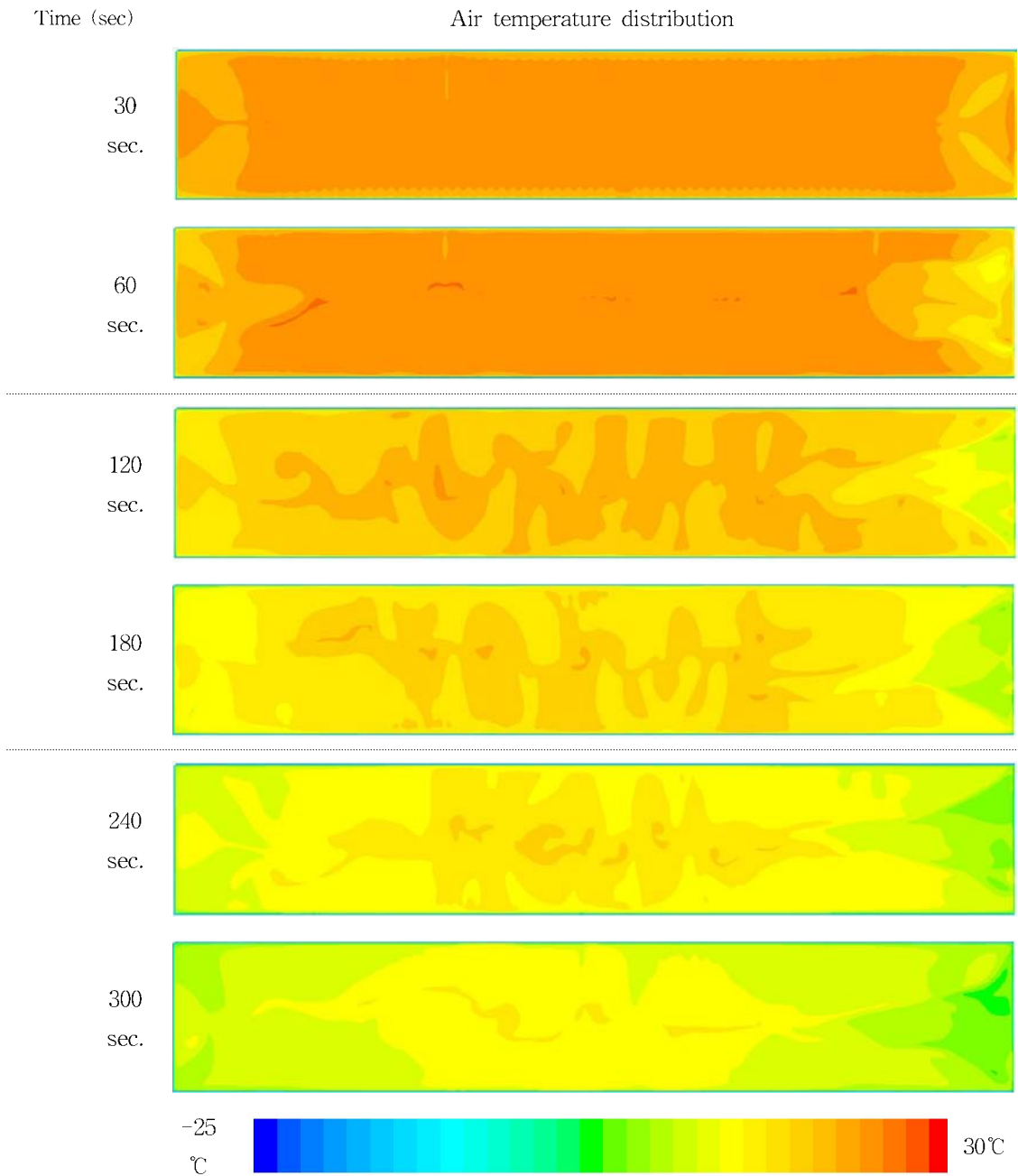


Fig. 3.3.8. 외기 온도 -25℃, 11일령 조건일 때 운영 지침 별 환기 시스템 작동 후 추가 열원 공급이 필요한 시각/환기 시스템 작동 후 300초 이후 계군 높이(40cm) 열환경 분포

11일령 설계 환기량에 대한 각 조건에 대하여 생육 적정 온도를 기준으로 온도 적정성을 평가하기 위하여 전산유체역학 메인 모듈인 FLUENT를 이용하여 바닥으로부터 40cm 떨어져 있는 평면 즉 가상의 계군에 대한 열환경 분포를 파악하고자 하였다. 이를 위하여 해당 평면에서의 수치 해석을 위한 각각의 cell로부터의 온도

값을 추출하여 각 운영 기준 운영 지침에 어느 정도 부합되는지를 평가하고자 하였다. 이때 벽체에서의 전도 열손실로 균일성이 과소 평가되는 것을 방지하기 위하여 사방의 측벽으로부터 20cm 떨어진 평면 cell 에서의 온도 값을 추출하고자 하였다. 이에 대한 결과는 다음 표와 같다. 퍼센트로 표현되는 값은 전체 각 cell에 대한 온도 값 대비 해당 기준에 부합되는 cell 의 비율로써 균일성 및 적정성을 평가하기 위한 임의 지표이다.

Table 3.3.13. 11일령 조건 시 계군 cell에서 추출한 온도값을 토대로 한 복합 환기 시스템 연속 운전 시 추가 열원의 공급이 권장되는 시기 당시 적정성 평가 (운영 지침: $\pm 2^{\circ}\text{C}$)

Outdoor air temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Time when the additional heat is needed from initial operation of ventilation (sec)	Suitability ratio (%)
-5	22	26.0
-15	16	42.9
-25	12	53.2

운영 지침을 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 적용할 경우 -5°C 외기 조건일 경우 복합 환기 시스템 작동에 있어서 적정 온도 수준에 도달하는 22초의 경우 26% 정도의 균일성을 보이고 있는 것으로 나타났으며 -15°C 의 외기 조건일 때 적정 온도 수준에 도달하는 16초 시 약 42.9%, -25°C 의 외기 조건일 때 12초 후에는 53.2% 수준에서 균일성을 보이는 것으로 나타났다. 11일령 조건의 경우 HRV 환기 시스템만을 가동할 경우 외기에 따라 가온되어 공급되는 외기에 의하여 점차 전체적인 온도 하락 현상을 보이므로 적정 온도 수준의 유지 및 균일성의 향상 등을 위하여 추가적인 열원의 공급, 내부 기류 순환팬 등의 설치가 필요할 것이라 판단된다.

운영지침 $\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 에 대하여 각 외기 조건 별 적정 온도에 도달하는 시간 및 그 당시 균일성 지수는 각각 다음 표와 같다.

Table 3.3.14. 11일령 조건 시 계군 cell에서 추출한 온도값을 토대로 한 복합 환기 시스템 연속 운전 시 추가 열원의 공급이 권장되는 시기 당시 적정성 평가 (운영 지침: $\pm 3^{\circ}\text{C}$)

Outdoor air temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Time when the additional heat is needed from initial operation of ventilation (sec)	Suitability ratio (%)
-5	27	65.7
-15	20	34.5
-25	16	37.7

Table 3.3.15. 11일령 조건 시 계군 cell에서 추출한 온도값을 토대로 한 복합 환기 시스템 연속 운전 시 추가 열원의 공급이 권장되는 시기 당시 적정성 평가 (운영 지침: $\pm 5^{\circ}\text{C}$)

Outdoor air temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Time when the additional heat is needed from initial operation of ventilation (sec)	Suitability ratio (%)
-5	134	60.0
-15	71	68.2
-25	22	72.5

다. 25일령 환경 조건 시 HRV 복합 환기 시스템 운전 주기 도출

동절기 육계 25일령 기준, 계군 적정 환경 조성을 위한 필요 환기량은 13,600 CMH 규모로써, HRV 시스템 적용 계사의 환기 운영은 3기의 HRV 시스템을 추가동하여 9,000 CMH (기기당 3,000 CMH) 규모의 가온된 외기를 공급하고 잔여 4,600 CMH 는 계사 내 기존 일반 환기 시스템 즉, 크로스 배기 팬 및 측벽 슬롯을 이용한 음압식 환기를 통하여 달성하게 된다. 따라서 HRV 시스템의 경우 생육 기간 동안 연속 운전이 실시되며 잔여 4,600 CMH 규모의 환기량은 기존 일반 환기 시스템의 주기 운영을 통하여 달성한다. 각 외기 조건에 따른 운영 지침 별 환기 시스템의 적정 운전 주기 산출에 앞서 HRV 시스템 및 일반 환기 시스템을 동시에 연속적으로 가동하여 형성되는 계군 내 열환경 변화를 모의하였다.

외기온이 각각 영하 5, 15, 25 $^{\circ}\text{C}$ 일 때 HRV 및 일반 환기 시스템의 60초간 작동에 따른 계군 내 영역별 온도 변화 추이는 각각 다음 표들과 같다.

Table 3.3.16. 외기 조건 -5℃, HRV 및 일반 환기 시스템을 연속 운전할 경우 영역별 온도 분포 (Unit: ℃)

time sec.	location of plane									ave.	max	min	diff.
	1-1	1-2	1-3	2-1	...	4-3	5-1	5-2	5-3				
1	22.5	22.6	22.5	22.5	...	22.5	22.5	22.6	22.5	22.5	22.6	22.5	0.2
2	22.5	22.7	22.5	22.5	...	22.5	22.5	22.7	22.5	22.6	22.7	22.5	0.3
3	22.5	22.8	22.5	22.6	...	22.6	22.5	22.8	22.5	22.7	22.9	22.5	0.4
4	22.6	22.9	22.5	22.7	...	22.6	22.6	22.9	22.6	22.7	23.0	22.5	0.5
5	22.6	23.0	22.6	22.8	...	22.7	22.6	23.0	22.6	22.8	23.2	22.6	0.6
6	22.6	23.1	22.6	22.8	...	22.8	22.7	23.2	22.6	22.9	23.3	22.6	0.7
7	22.7	23.2	22.6	22.9	...	22.8	22.7	23.3	22.6	23.0	23.5	22.6	0.9
8	22.6	23.4	22.6	22.9	...	22.8	22.7	23.4	22.5	23.0	23.7	22.5	1.1
9	22.5	23.5	22.5	22.9	...	22.8	22.6	23.6	22.3	23.0	23.9	22.3	1.5
10	22.4	23.7	22.4	22.8	...	22.6	22.5	23.7	22.0	23.0	24.1	22.0	2.0
11	22.1	23.8	22.0	22.6	...	22.2	22.3	23.9	21.6	22.8	24.3	21.6	2.7
12	21.8	24.0	21.6	22.3	...	21.7	22.1	24.0	21.1	22.6	24.6	21.1	3.5
13	21.4	24.1	21.0	22.0	...	21.1	21.8	24.1	20.5	22.4	24.7	20.5	4.2
14	21.1	24.1	20.4	21.6	...	20.5	21.5	24.0	20.0	22.1	24.7	20.0	4.8
15	20.7	23.9	19.9	21.3	...	20.0	21.3	23.7	19.5	21.7	24.6	19.5	5.1
16	20.4	23.5	19.5	20.9	...	19.6	21.0	23.4	19.0	21.3	24.3	19.0	5.3
17	20.2	23.1	19.1	20.6	...	19.2	20.8	22.9	18.6	21.0	23.9	18.6	5.2
18	20.0	22.6	18.7	20.3	...	18.8	20.6	22.4	18.3	20.6	23.3	18.3	5.0
19	19.9	22.0	18.4	20.1	...	18.5	20.4	21.9	18.0	20.2	22.7	18.0	4.7
20	19.8	21.5	18.2	20.0	...	18.2	20.3	21.4	17.7	19.9	22.0	17.7	4.3
21	19.7	21.0	18.0	19.9	...	17.9	20.2	20.9	17.5	19.6	21.5	17.5	3.9
22	19.7	20.7	17.8	19.8	...	17.8	20.1	20.5	17.3	19.4	21.0	17.3	3.7
23	19.6	20.4	17.6	19.8	...	17.6	20.0	20.2	17.2	19.2	20.7	17.2	3.5
24	19.6	20.2	17.5	19.7	...	17.5	19.9	19.9	17.0	19.1	20.5	17.0	3.4
25	19.6	20.1	17.4	19.7	...	17.4	19.9	19.7	16.9	19.0	20.3	16.9	3.3
.
.
.
59	19.4	18.5	17.8	19.1	...	18.1	19.2	18.0	17.1	18.5	19.4	17.1	2.3
60	19.4	18.4	17.7	19.0	...	18.0	19.1	18.0	17.0	18.4	19.4	17.0	2.3

Table 3.3.17. 외기 조건 -15℃, HRV 및 일반 환기 시스템을 연속 운전할 경우 영역별 온도 분포 (Unit: ℃)

time sec.	location of plane									ave.	max	min	diff.
	1-1	1-2	1-3	2-1	...	4-3	5-1	5-2	5-3				
1	22.4	22.6	22.4	22.5	...	22.5	22.4	22.6	22.4	22.5	22.6	22.4	0.2
2	22.4	22.7	22.4	22.5	...	22.5	22.4	22.7	22.4	22.5	22.7	22.4	0.4
3	22.4	22.8	22.4	22.5	...	22.5	22.4	22.8	22.4	22.6	22.9	22.4	0.5
4	22.4	22.8	22.3	22.5	...	22.5	22.4	22.9	22.4	22.6	23.0	22.3	0.7
5	22.3	22.9	22.3	22.6	...	22.5	22.4	23.0	22.3	22.7	23.2	22.3	0.8
6	22.3	23.0	22.3	22.6	...	22.5	22.3	23.1	22.2	22.7	23.3	22.2	1.1
7	22.1	23.2	22.2	22.5	...	22.4	22.2	23.2	22.0	22.7	23.5	22.0	1.5
8	21.9	23.3	21.9	22.3	...	22.1	22.0	23.4	21.6	22.5	23.7	21.6	2.1
9	21.5	23.4	21.4	22.0	...	21.6	21.7	23.5	21.0	22.3	23.9	21.0	3.0
10	21.0	23.5	20.7	21.6	...	20.9	21.3	23.6	20.2	22.0	24.2	20.2	4.0
11	20.5	23.6	19.9	21.1	...	20.0	20.9	23.6	19.3	21.5	24.3	19.3	5.1
12	20.0	23.5	19.0	20.6	...	19.1	20.5	23.4	18.4	21.1	24.3	18.4	5.9
13	19.5	23.3	18.2	20.1	...	18.3	20.1	23.1	17.6	20.6	24.1	17.6	6.4
14	19.2	22.8	17.5	19.7	...	17.6	19.8	22.6	17.0	20.0	23.7	17.0	6.7
15	18.9	22.2	17.0	19.3	...	17.1	19.5	22.0	16.4	19.5	23.1	16.4	6.6
16	18.6	21.5	16.5	19.0	...	16.6	19.2	21.3	16.0	19.0	22.3	16.0	6.3
17	18.5	20.8	16.1	18.7	...	16.2	19.0	20.6	15.6	18.6	21.5	15.6	5.9
18	18.4	20.1	15.8	18.6	...	15.9	18.9	20.0	15.3	18.2	20.7	15.3	5.4
19	18.3	19.5	15.6	18.4	...	15.7	18.7	19.4	15.0	17.9	20.0	15.0	5.0
20	18.2	19.1	15.4	18.3	...	15.5	18.6	18.8	14.8	17.6	19.5	14.8	4.7
21	18.1	18.7	15.2	18.3	...	15.4	18.5	18.4	14.7	17.4	19.1	14.7	4.4
22	18.0	18.5	15.1	18.2	...	15.3	18.4	18.0	14.5	17.2	18.8	14.5	4.2
23	17.9	18.2	15.1	18.1	...	15.3	18.3	17.7	14.5	17.1	18.5	14.5	4.1
24	17.9	18.0	15.0	18.0	...	15.2	18.3	17.4	14.4	17.0	18.3	14.4	3.9
25	17.8	17.8	15.0	18.0	...	15.2	18.2	17.2	14.4	16.9	18.2	14.4	3.9
.
.
.
59	16.2	15.4	14.2	16.2	...	14.5	16.0	14.7	13.4	15.3	16.4	13.4	3.0
60	16.1	15.3	14.1	16.1	...	14.4	16.0	14.6	13.4	15.2	16.4	13.4	3.1

Table 3.3.18. 외기 조건 -25℃, HRV 및 일반 환기 시스템을 연속 운전할 경우 영역별 온도 분포 (Unit: ℃)

time sec.	location of plane									ave.	max	min	diff.
	1-1	1-2	1-3	2-1	...	4-3	5-1	5-2	5-3				
1	22.4	22.5	22.3	22.4	...	22.4	22.4	22.6	22.4	22.5	22.6	22.3	0.3
2	22.3	22.6	22.3	22.4	...	22.4	22.3	22.6	22.3	22.5	22.7	22.3	0.5
3	22.2	22.7	22.2	22.4	...	22.4	22.3	22.7	22.2	22.5	22.9	22.2	0.7
4	22.1	22.8	22.1	22.4	...	22.3	22.2	22.8	22.1	22.5	23.0	22.1	0.9
5	22.0	22.9	22.0	22.3	...	22.3	22.1	22.9	22.0	22.5	23.2	22.0	1.2
6	21.8	23.0	21.8	22.2	...	22.1	21.9	23.0	21.6	22.4	23.3	21.6	1.7
7	21.4	23.0	21.4	21.9	...	21.7	21.5	23.1	21.0	22.1	23.5	21.0	2.5
8	20.8	23.2	20.7	21.4	...	20.9	21.0	23.2	20.1	21.7	23.8	20.1	3.7
9	20.1	23.2	19.6	20.8	...	19.7	20.4	23.2	18.9	21.2	24.0	18.9	5.0
10	19.4	23.2	18.4	20.1	...	18.5	19.9	23.1	17.7	20.6	24.0	17.7	6.3
11	18.8	22.9	17.3	19.4	...	17.4	19.3	22.8	16.6	19.9	23.8	16.6	7.2
12	18.2	22.4	16.3	18.8	...	16.4	18.8	22.2	15.6	19.2	23.3	15.6	7.7
13	17.8	21.7	15.5	18.3	...	15.6	18.4	21.5	14.8	18.5	22.6	14.8	7.8
14	17.5	20.8	14.8	17.8	...	14.9	18.0	20.6	14.2	17.9	21.7	14.2	7.6
15	17.2	19.9	14.3	17.5	...	14.4	17.8	19.7	13.6	17.3	20.7	13.6	7.1
16	17.0	19.0	13.9	17.3	...	14.0	17.5	18.9	13.2	16.7	19.7	13.2	6.5
17	16.9	18.3	13.5	17.1	...	13.7	17.4	18.0	12.8	16.3	18.8	12.8	6.0
18	16.8	17.7	13.3	17.0	...	13.5	17.2	17.3	12.5	16.0	18.1	12.5	5.6
19	16.7	17.2	13.1	16.8	...	13.3	17.1	16.7	12.3	15.7	17.6	12.3	5.3
20	16.5	16.7	13.0	16.7	...	13.2	17.0	16.2	12.2	15.4	17.1	12.2	4.9
21	16.4	16.4	12.9	16.6	...	13.2	16.9	15.7	12.1	15.2	16.9	12.1	4.8
22	16.3	16.0	12.9	16.5	...	13.1	16.7	15.3	12.0	15.1	16.7	12.0	4.7
23	16.2	15.7	12.8	16.4	...	13.1	16.7	15.0	12.0	14.9	16.7	12.0	4.6
24	16.0	15.5	12.9	16.3	...	13.1	16.6	14.7	12.0	14.8	16.6	12.0	4.6
25	15.9	15.2	12.9	16.2	...	13.1	16.5	14.5	12.0	14.7	16.5	12.0	4.5
.
.
.
59	12.9	12.1	10.6	13.1	...	10.8	12.2	11.0	9.7	11.8	13.3	9.7	3.6
60	12.9	12.0	10.5	13.0	...	10.7	12.1	10.9	9.6	11.7	13.2	9.6	3.6

외기온이 영하 5℃인 경우, 운영 지침을 적용하는데 있어 계사 운영자의 계군 기
 대 온도 즉, 25일령의 경우 22.5℃를 기준으로 ±2℃를 계군 생육 온도 범위로 설정
 할 경우 계군 영역 별 평균 온도를 토대로 HRV 환기 시스템 및 일반 강제 환기
 시스템 (측면 배기팬+입기 슬롯)의 운전이 시작된 후 18초 후 적정 온도 범위를 만
 족하는 최저치에 도달하는 것으로 나타났다. 적정 생육 온도 범위를 ±3℃로 설정할
 경우 22초, ±5℃가 기준일 때 84초인 것으로 나타났다. 이때 각 영역별 최고 온도
 및 최저 온도간의 편차는 각각 5.0℃, 3.7℃, 2.6℃인 것으로 나타났다. 영역별 온도
 차를 토대로 균일성을 판단할 수 있는 표준 편차의 값 역시 각각 1.8℃, 1.4℃, 0.
 8℃로 환기 시스템의 작동 시간이 길게 주어질수록 영역 간 온도 차이가 다소 감소
 하는 것으로 나타났다. 각 운영 지침 별 적정 생육 온도 범위를 만족하는 환기 시
 스템의 작동 시간을 환기 시스템의 “on time”이라 정의할 때 25일령 육계의 요구
 환기량의 잔여치, 즉 13,600 CMH 중 9,000 CMH 규모의 풍량은 HRV 시스템이 충
 당하고 잔여 4,600 CMH 풍량 요구를 만족하기 위한 일반 강제 환기 시스템의 정
 지 시간을 “off time”이라 정의할 수 있다. “off time”을 산출하기 위하여 잔여 목표
 환기량 대비 전체 팬 환기량 값을 이용하여 산출한 외기 온도 조건 대비 각 운영
 지침 별 환기 시스템의 가동 및 중지시간은 다음과 같다.

Table 3.3.19. 25일령 조건 시 외기 온도 대비 운영 기준에 따른 일반 환기 시스템 on/off
 (Unit: sec.)

Outdoor temp.	ventilation	±2℃		±3℃		±5℃	
-5℃	fan (on)	18	118	22	144	84	548
	fan (off)	100		122		464	
-15℃	fan (on)	13	84	15	98	21	137
	fan (off)	71		83		116	
-25℃	fan (on)	10	66	12	79	15	98
	fan (off)	56		67		83	

- HRV 환기 시스템의 운전은 연속적으로 이루어짐.

즉, HRV 시스템 및 본 연구 대상 육계사와 동일한 환기 시스템 형태를 지닌 구조
 에 대하여 건물의 노후화 등에 따른 틈새 누출이 없다고 가정할 경우, 주어진 외기
 온도에 따라 계사 운영주의 난방 운영 기준에 맞추어 각각 환기 시스템의 가동 및

중지 시간을 상기 표와 같이 제시할 수 있다.

25일령 설계 환기량 기준, 외기 조건 및 운영 지침 조건 별 환기 시스템의 작동/중지에 따른 계군 내 평균 온도 변화 추이는 각각 다음 그림과 같다.

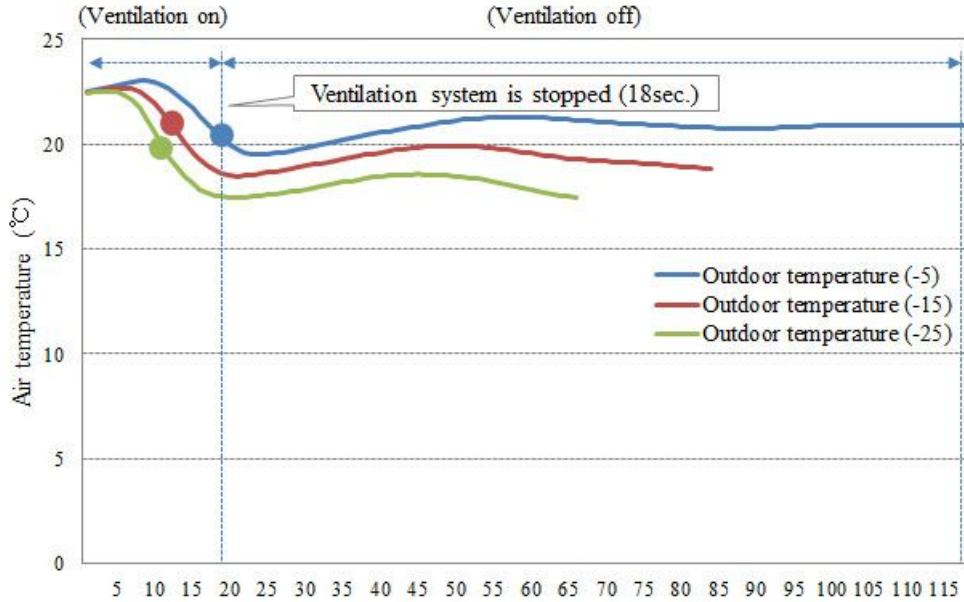


Fig. 3.3.9. 25일령 조건 시 운영 기준이 설계 기준 온도 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 일 때 일반 환기 시스템 가동 및 중지 에 따른 계군 내 평균 온도 변화 추이

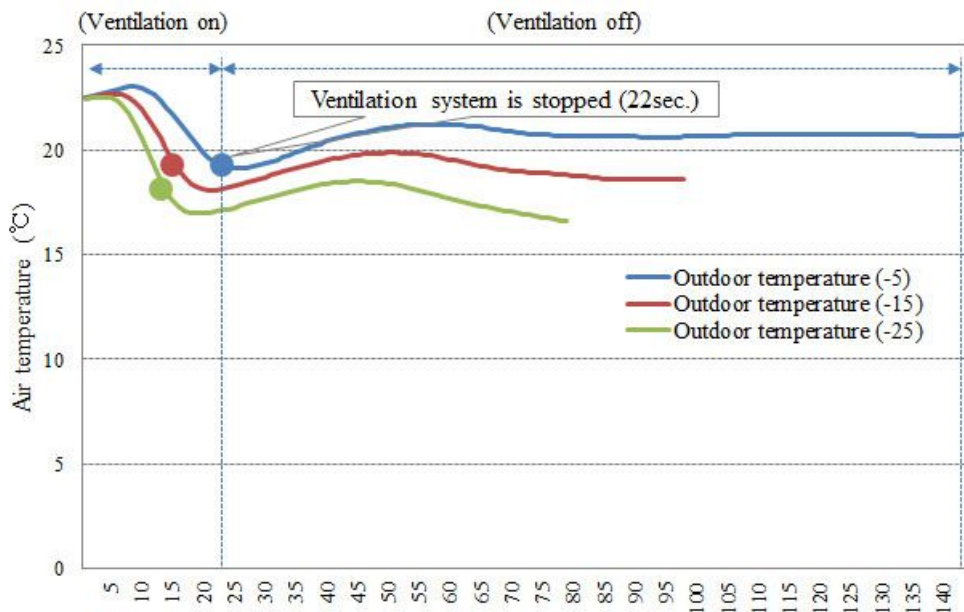


Fig. 3.3.10. 25일령 조건 시 운영 기준이 설계 기준 온도 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 일 때 일반 환기 시스템 가동 및 중지 에 따른 계군 내 평균 온도 변화 추이

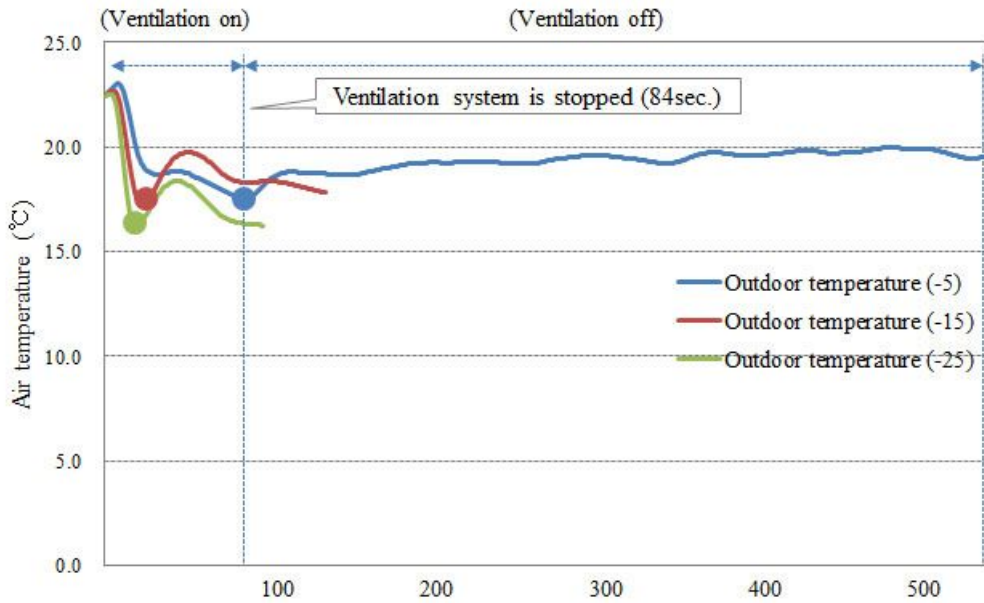


Fig. 3.3.11. 25일령 조건 시 운영 기준이 설계 기준 온도 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 일 때 일반 환기 시스템 가동 및 중지애 따른 계군 내 평균 온도 변화 추이

외기온도 -5°C , 운영 지침이 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 인 경우 추천되는 기존 측면 배기팬의 작동 시간은 18초이다. 환기 팬의 작동이 중지된 후 계군 내에서의 평균 온도는 다소 하락하다가 22°C 내외로 다시 회복하는 경향을 보이는데 이는 계사 상부에 존재하는 HRV 시스템으로부터 공급되는 가온된 외기, 벽면으로부터의 전도 열손실 등을 고려하여 대략 환기 시스템이 작동 된 지 1분후 어느 정도 열평형에 도달했음을 알 수 있다. 외기 온도가 -15°C , -25°C 조건일 때 환기 시스템이 작동이 중지된 후 어느 정도 열회복이 발생하다가 특정 시점 이후에 다시 평균 온도가 하락하는 구간을 보이는데 이는 계군에서의 heat flux, HRV 시스템으로부터 공급되는 가온된 외기에 의한 열 공급량에 비하여 벽체에서의 전도 열손실량이 상대적으로 크기 때문에 온도 하락 구간을 갖는 것으로 판단할 수 있다. 각각의 추천되는 환기 시스템의 “on time” 이후에 계군 내 온도가 양으로 회복하는 경우, 추가적인 열원의 공급이 불필요하나 온도 하락 구간을 보이는 구조에 대하여 추가적인 열원의 공급이 필요하다. 즉, 예를 들어 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 조건일 경우 기준 온도 $+5^{\circ}\text{C}$ 까지 열환경을 조성하는 등 적정 열환경 조건을 유지한 후 다음의 환기 주기를 시작할 때 예측된 환기 주기 및 예측 열환경을 토대로 적정 환기 운영 지침, 난방 운영 지침을 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

외기 온도가 -5°C 일 때 각 운영 기준에 따른 지역별 온도 분포는 다음과 같다.

Table 3.3.20. 25일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
18 on time	20.0	20.3	20.3	20.3	20.6	23.3	18.3
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	22.6	23.3	22.7	23.2	22.4	20.6	5.0
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	18.7	18.8	18.4	18.8	18.3	1.8	
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
118 off time	20.2	20.9	20.7	20.3	20.4	22.8	19.7
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	21.2	22.8	22.6	22.6	21.0	20.9	3.0
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	20.4	20.0	20.4	20.3	19.7	1.0	
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.

외기 조건이 -5℃, 설계 운영 조건이 ±2℃일 때, 시뮬레이션 연산을 통하여 산출된 환기팬 작동 시간은 18초이며, 환기팬 작동 중지 시간은 100초로 총 118초의 환기 싸이클을 산출하였다. 상기 조건일 때 환기 시스템이 작동 된 후 종료 되는 순간의 평균 온도는 20.6℃로 설계 운영 조건에 부합되었으며 지역별 최고 및 최소 온도 차는 약 5.0℃, 표준 편차는 1.8℃로 나타났다. 이후 환기 시스템의 작동이 중지된 후 100초가 지난 후 내부 평균 온도는 20.9℃로 약 0.3℃가량 상승하였고 온도 편차는 3.0℃로 약 2.0℃감소, 표준 편차는 1.0℃로 나타났다. 이는 차가운 외기의 공급이 중단됨에 따라 유입된 공기와 내부에 존재하는 공기와의 열교환이 발생하였고, 또한 지속적으로 계군 바닥 면에서 계군 발열량에 해당되는 열량이 공급되기 때문으로 판단된다. Fig. 3.2.6에서 확인할 수 있듯이 환기팬의 작동이 중지된 후 약간의 온도 하락 구간을 거친 후 다시 회복되다가 어느 정도 일정한 온도에 수렴하는 현상을 보이는데 이는 내부에서 발생하는 열량 및 전도로 인한 벽체, 지붕에서의 열손실량 등을 고려하여 열평형에 도달하였음을 의미한다. 환기팬의 작동이 중지되는 시점에서 배기팬이 위치하는 n-1 행에 비하여 입기 슬롯의 개수가 더 많은 n-3 행에서 약 1.70℃ 낮은 온도 분포를 보이다가 환기팬의 작동이 중지되는 100초 동안 어느 정도 열회복이 되어 n-1의 경우 약 20.46℃, n-3의 경우 20.16℃로 0.3℃의 온

도 편차를 보이는 것으로 나타났다.

Table 3.3.21. 25일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (°C)						
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
22 on time	19.7	19.8	19.8	19.8	20.1	21.0	17.3
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	20.7	21.0	20.6	21.0	20.5	19.4	3.7
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	17.8	17.8	17.6	17.8	17.3	1.4	
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
144 off time	19.7	20.9	20.9	20.7	20.1	22.4	19.7
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	20.9	22.4	22.3	22.3	20.6	20.7	2.8
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	20.1	20.3	19.7	19.8	19.8	1.0	
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.

운영지침 ±3℃의 경우 환기팬 작동 전후 비교 시 평균 온도는 0.7℃가량 상승하였으나 최고 온도 및 최소 온도 간의 편차 값은 0.9℃하락, 지역 별 표준 편차 역시 0.4℃ 하락하는 결과를 보였다. 폭방향 별 편차의 경우 환기 팬의 작동이 중지되는 22초 시점의 경우 n-1은 19.84℃, n-3은 17.66℃로 약 2.18℃ 가량의 온도 편차를 보였으며 전체 환기 주기가 종료되는 시점인 144초 이후의 경우 n-1은 20.46℃, n-3은 19.94℃로 약 0.52℃의 온도 편차를 보여 폭방향 별 온도 편차는 다소 감소하는 것으로 나타났다.

Table 3.3.22. 25일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
84 on time	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	18.4	18.4	18.4	18.7	18.2	18.7	16.1
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	17.2	18.3	17.4	18.0	16.7	17.5	2.6
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	16.6	16.8	16.9	17.0	16.1	0.8	
548 off time	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	17.9	21.7	19.6	20.8	17.0	21.9	17.0
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	19.9	21.9	19.8	21.4	19.9	19.6	4.9
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	17.9	20.2	18.3	19.7	18.1	1.5	

운영 지침 ±5℃의 경우 평균 온도는 2.1℃가량 상승하였으나 최고 온도 및 최소 온도 간의 편차 값은 2.3℃ 증가, 지역 별 표준 편차 역시 0.7℃ 증가하는 결과를 보였다.

외기 조건 -5℃일 때 운영 지침에 따른 환기 시스템의 작동/중지에 따른 계군 높이 즉, 바닥으로부터 40cm 높이에서의 열환경 분포는 다음 그림과 같다. 환기 시스템이 작동되는 동안에는 입기 슬롯으로부터 외기가 유입되는 구역의 경우 상대적으로 낮은 온도 분포 인한 온도 불균일성을 형성하여 닭의 쏠림 현상 및 호흡기성 질병에 대한 노출이 증가 될 수 있을 것이라 사료된다. 환기 시스템의 작동이 중지되는 동안 환기 시스템이 작동될 때와 비교하여 정성적인 열환경 분포를 토대로 상대적으로 공기층의 열교환이 이루어지는 것으로 판단할 수 있다.

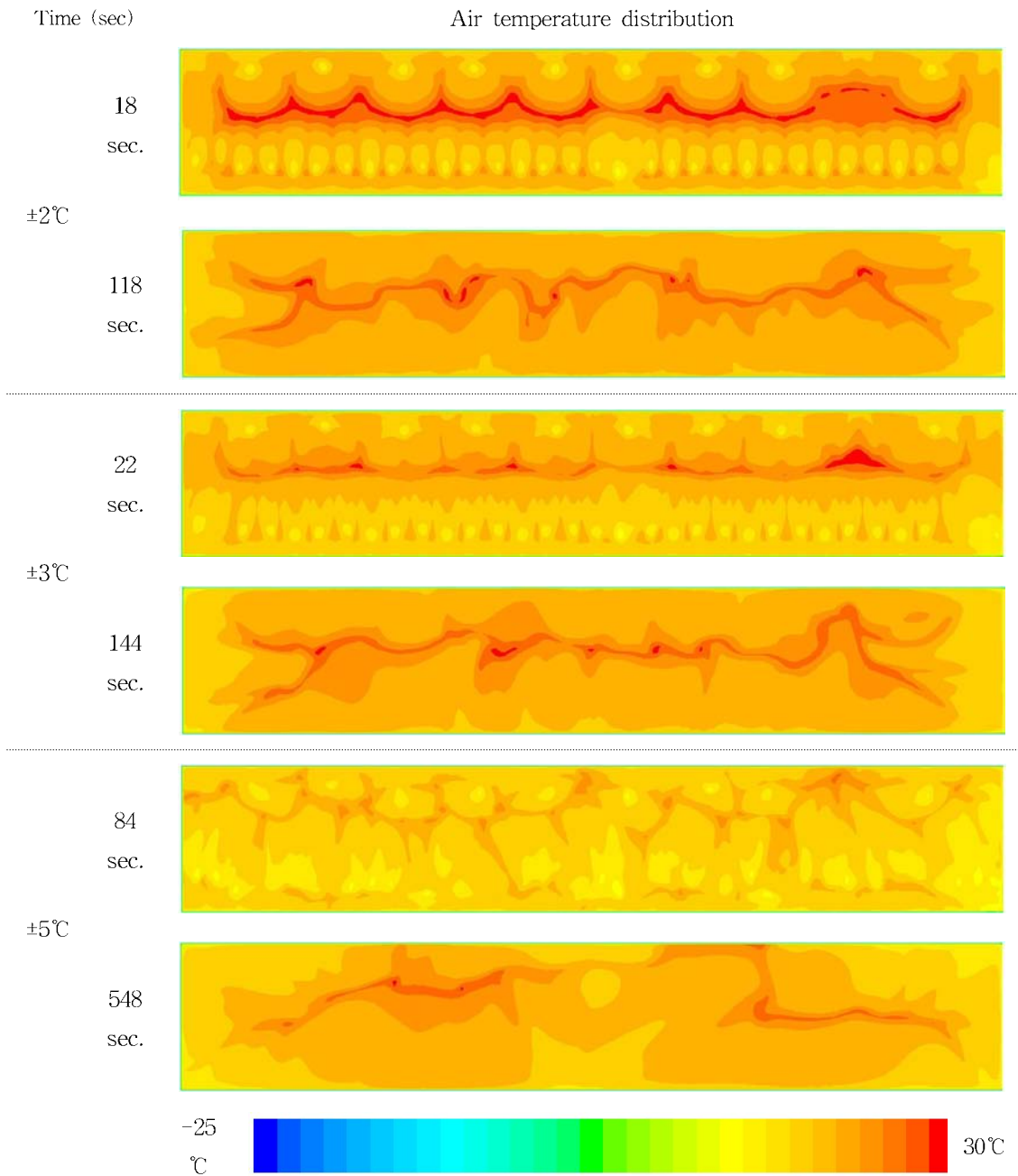


Fig. 3.3.12. 외기 온도 -5°C , 25일령 조건일 때 운영 지침 별 복합 환기 시스템 작동/중지에 따른 계군 높이(40cm) 열환경 분포

외기 조건이 -15°C 일 때 각 운영 지침에 따른 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포는 다음과 같다.

Table 3.3.23. 25일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
13 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	19.5	20.1	20.1	20.1	20.1	24.1	17.6
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	23.3	24.1	23.7	24.1	23.1	24.1	6.4
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	18.2	18.3	17.8	18.3	17.6	2.4	
84 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	17.7	19.0	19.3	18.9	17.4	21.2	17.4
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	19.7	20.6	21.0	21.2	18.8	18.8	3.8
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	17.4	18.0	17.7	17.9	17.5	1.3	

운영 지침이 ±2℃인 경우 환기 시스템의 작동 / 중지에 대하여 84초의 환기 시스템 운전 사이클이 종료되는 시점에 약 5.3℃의 온도 하락을 보이는 반면 온도 균일성은 약간 상승하는 것으로 나타났다. 이는 환기 시스템의 작동이 중지됨에 따라 외기의 유입이 이루어지지 않고 내부의 공기 간의 혼합이 이루어지기 때문으로 사료된다. 앞선 외기 온도 -5℃결과와 마찬가지로, n-1 보다 n-3 구역에서 낮은 온도 분포를 보이고 있으며 환기 시스템이 작동되는 동안 벽 인근에서 열환경 관리에 주의를 기울여야 될 것으로 판단된다. 환기 시스템의 동작이 멈춘 후에는 이러한 폭 방향에 따른 온도 편차는 줄어드는 것으로 나타났다.

Table 3.3.24. 25일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
15 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	18.9	19.3	19.2	19.3	19.5	23.1	16.4
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	22.2	23.1	22.4	23.0	22.0	19.5	6.6
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	17.0	17.1	16.6	17.0	16.4	2.4	
98 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	17.4	18.3	18.7	18.3	17.4	20.8	17.2
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	19.6	20.8	20.2	20.5	18.1	18.6	3.7
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	18.0	18.5	18.0	18.3	17.2	1.1	

Table 3.3.25. 25일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
15 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	18.9	19.3	19.2	19.3	19.5	23.1	16.4
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	22.2	23.1	22.4	23.0	22.0	19.5	6.6
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	17.0	17.1	16.6	17.1	16.4	2.4	
98 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	17.4	18.3	18.7	18.3	17.4	20.8	17.2
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	19.6	20.8	20.2	20.5	18.1	18.6	3.7
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	18.0	18.5	18.0	18.3	17.2	1.1	

운영 지침이 $\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 인 경우 앞선 경우와 마찬가지로 환기 시스템이 작동되는 동안 폭 방향에 따른 온도 불균일성이 발견되었다. 이는 입기 슬롯을 이용하는 강제 환기 시스템에서 불가피한 결과이나 복합 환기 시스템에서는 일반 강제 환기 시스템만을 적용할 때에 비하여 다소 그 온도 편차가 작게 나타났다.

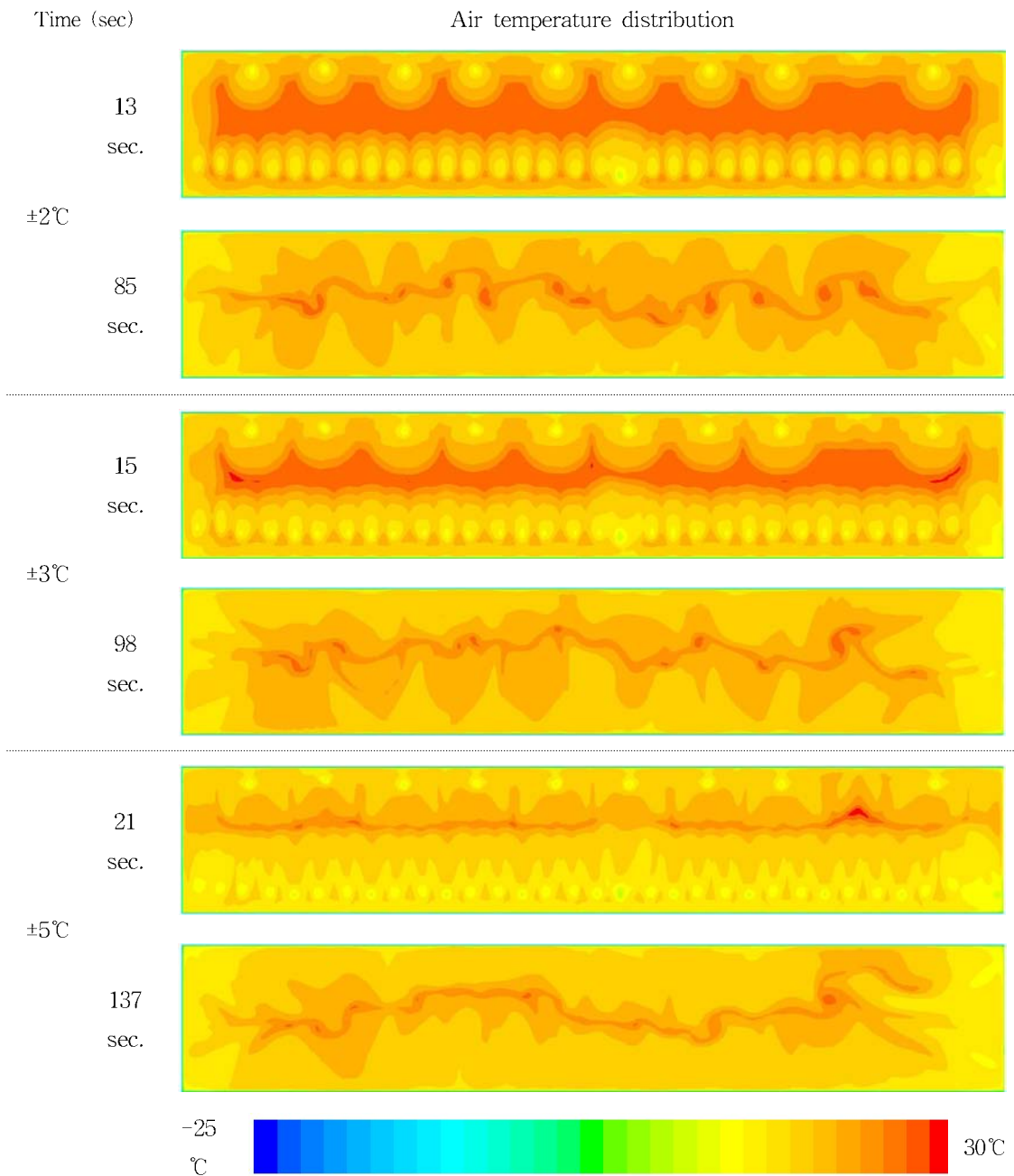


Fig. 3.3.13. 외기 온도 -15°C , 25일령 조건일 때 운영 지침 별 복합 환기 시스템 작동/중지에 따른 계군 높이(40cm) 열환경 분포

외기 조건이 -25℃일 때 각 운영 지침에 따른 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포는 다음과 같다. 앞선 외기 조건 및 운영 지침 조건 결과와 마찬가지로 복합 환기 시스템이 작동되는 동안 폭방향 온도 구배가 발생하며 환기 시스템의 작동이 중지 될 때 열교환에 의한 열적 균일성 향상이 일어나는 것을 발견할 수 있다.

Table 3.3.26. 25일령 조건 시 외기 온도 -25℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (°C)						
10 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	19.4	20.1	20.1	20.0	19.9	24.0	17.7
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	23.2	24.0	23.8	24.0	23.1	20.6	6.3
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	18.4	18.4	17.8	18.5	17.7	2.4	
66 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	15.8	16.6	16.9	16.6	15.8	20.1	15.8
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	18.9	20.1	20.0	19.8	17.6	17.5	4.3
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	16.5	17.3	17.0	17.2	15.8	1.5	

Table 3.3.27. 25일령 조건 시 외기 온도 - 25℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
12 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	18.2	18.8	18.8	18.8	18.8	23.3	15.6
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	22.4	23.3	22.8	23.3	22.2	19.2	7.7
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	16.3	16.3	15.8	16.4	15.6	2.9	
79 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	15.0	16.8	16.9	16.5	15.2	19.0	15.0
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	17.5	18.7	19.0	18.9	15.9	16.6	4.0
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	15.5	15.9	15.9	16.5	15.0	1.4	

Table 3.3.28. 25일령 조건 시 외기 온도 - 25℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
15 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	17.2	17.5	17.5	17.5	17.8	20.7	13.6
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	19.9	20.7	19.9	20.7	19.7	17.3	7.1
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	14.3	14.4	13.9	14.4	13.6	2.6	
98 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	14.9	16.7	16.4	16.2	14.8	18.4	14.8
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	17.2	18.4	18.4	18.3	15.1	16.2	3.7
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	15.6	15.6	15.1	16.0	14.8	1.3	

외기 조건이 -25°C 일 때 복합 환기 시스템의 운영 지침에 따른 지역 별 열환경 정 성적 결과는 다음과 같다.

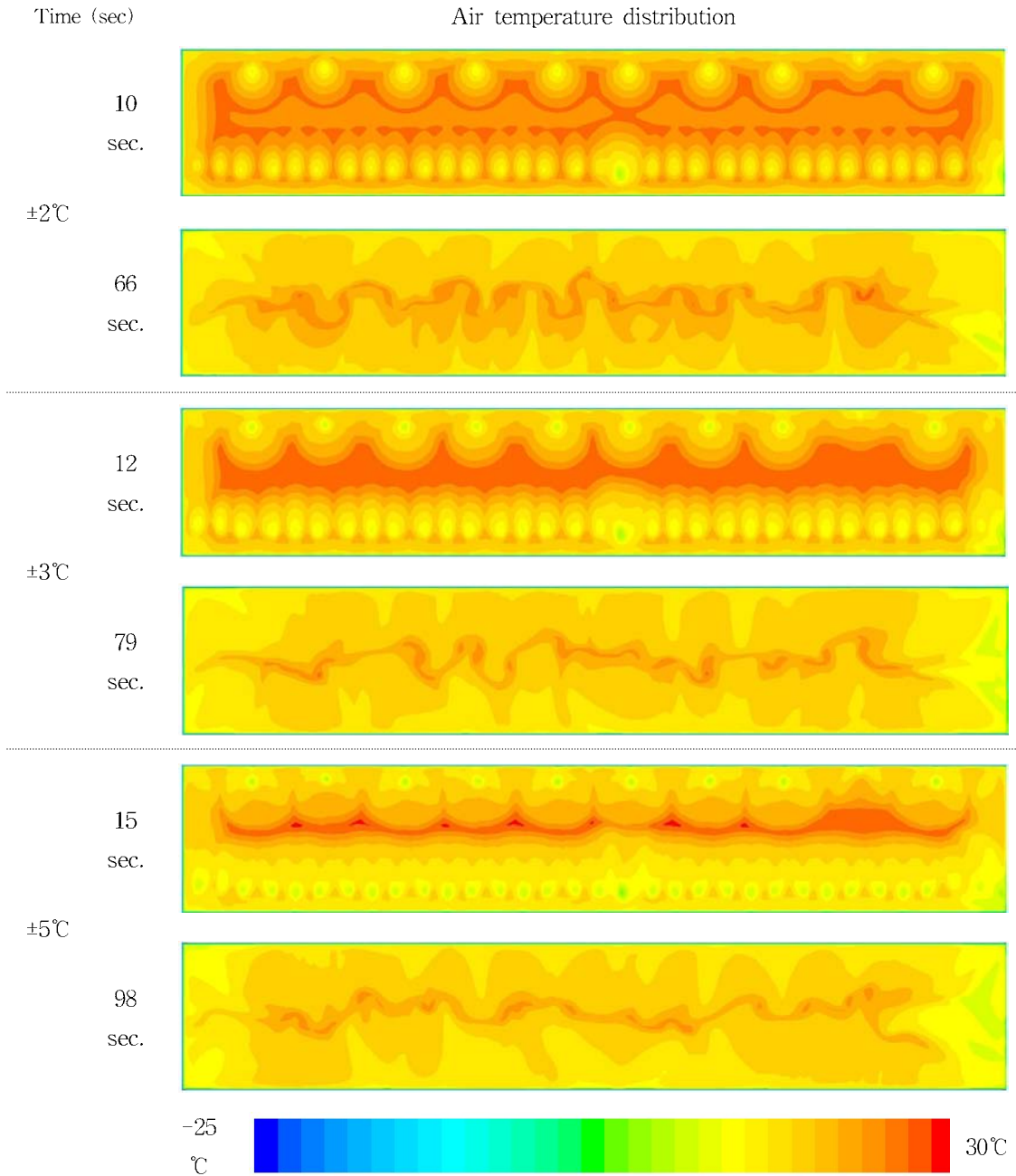


Fig. 3.3.14. 외기 온도 -15°C , 25일령 조건일 때 운영 지침 별 복합 환기 시스템 작동/중지에 따른 계군 높이(40cm) 열환경 분포

25일령 설계 환기량에 대한 각 조건에 대하여 생육 적정 온도를 기준으로 온도 적정성을 평가하기 위하여 전산유체역학 메인 모듈인 FLUENT를 이용하여 바닥으로부터 40cm 떨어져 있는 평면 즉 가상의 계군에 대한 열환경 분포를 파악하고자 하였다. 이때 균일성 및 적정성의 평가를 위한 지수는 각각의 환경 조건에 따라 다음과 같다.

Table 3.3.29. 25일령 조건 시 계군 cell에서 추출한 온도값을 토대로 한 적정성 평가
(운영 지침: $\pm 2^{\circ}\text{C}$)

Outdoor air temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Ventilation on	Ventilation off
-5	29.2%	56.7%
-15	23.8%	16.8%
-25	82%	51.8%

25일령 조건 시 복합 환기 시스템의 환기 가동에 있어서 운영 지침이 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 인 경우 HRV 환기 시스템은 연속운전을 실시하고 일반 환기 시스템의 경우 주기 운전을 실시할 때 일반 환기 시스템의 측면 배기팬의 가동이 중지되는 순간의 적정성 평가 지수는 외기 온도가 -5°C 일 때 29.2%, 환기팬이 주기 운전 방식에 따라 다시 가동되기 시작하는 순간, 즉 환기 시스템 한 주기가 종료되는 순간에는 56.7%로 약 27.5% 가량 상승된 결과를 보였다. 그러나 -15°C , -25°C 외기 조건의 경우 환기 팬의 가동이 중지되는 동안 환기 주기가 종료되는 시점에서 오히려 적정성 지수가 다소 감소하는 경향을 보이는데 이는 상대적으로 차가운 외기의 유입으로 인하여 계사 상부에 존재 하던 차가운 외기가 환기팬의 가동이 중지되는 동안에 내부와의 열혼합에 의해 계군 내 전체적인 온도하락을 야기시켰기 때문으로 판단된다. 따라서 외기 온도가 낮은 값을 보일수록 내부 열환경 관리에 더욱 주의를 요하며 추가적인 열원의 공급이 필수적임을 의미한다고 볼 수 있다.

운영지침이 ± 3 , $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 인 경우의 일반 환기 시스템 가동/중지에 따른 적정성 평가 지수는 각각 다음 표와 같다.

Table 3.3.30. 25일령 조건 시 계군 cell에서 추출한 온도값을 토대로 한 적정성 평가
(운영 지침: $\pm 3^{\circ}\text{C}$)

Outdoor air temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Ventilation on	Ventilation off
-5	42.6%	78.1%
-15	32.7%	33.1%
-25	39.5%	9.3%

Table 3.3.31. 25일령 조건 시 계군 cell에서 추출한 온도값을 토대로 한 적정성 평가
(운영 지침: $\pm 5^{\circ}\text{C}$)

Outdoor air temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Ventilation on	Ventilation off
-5	50.6%	87.0%
-15	49.2%	62.6%
-25	42.6%	29.9%

라. HRV 복합 환기 시스템 연속 및 on/off 운전에 따른 가스 제거율 평가

본 연구에서는 계사 내에서 발생할 수 있는 각종 가스상 유해물질의 제거율 등을 추정하기 위하여 전산유체역학 시뮬레이션 모델에 추적가스 개념을 도입하여 농도의 감쇠율을 산출하였다. 각 조건에 따른 구조 별로 시뮬레이션 연산 수행에 앞서 초기 조건으로 가상의 추적가스가 계사 전체에 가득 차 있다고 가정한 후 환기 시스템이 작동됨에 따라 내부의 가스가 제거되는 비율을 산정하고자 하였다. 외기 조건(-5°C , -15°C , -25°C)에 따른 각 운영 지침 별 (기준 온도 $\pm 2^{\circ}\text{C}$, $\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\pm 5^{\circ}\text{C}$) 조건에 따른 환기 시스템 작동 on/off 시 지역별 가스 제거율은 다음과 같다. 11일령 조건의 경우 연속 운전으로 가정되므로 300초간 환기 시스템을 연속으로 가동했을 때의 가스 제거율 및 연속 운전 시 계군 내 온도 모니터링을 통하여 적정 온도 구간에 도달하였다고 판단될 시각, 즉 추가적인 열원의 공급이 필요하다고 판단되는 시점에서의 가스 제거율을 제시하였다.

Table 3.3.32. 11일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃, ±3℃, ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
22 (±2℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.35	0.21
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	0.27	0.21	0.21	0.21	0.35	0.24	0.14
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
0.27	0.23	0.23	0.23	0.34	0.05		
27 (±3℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.66	0.21
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	0.30	0.22	0.22	0.22	0.40	0.35	0.45
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
0.59	0.55	0.56	0.55	0.66	0.18		
134 (±5℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	0.68	1.56	0.82	0.81	0.47	3.16	0.47
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	1.81	2.73	2.09	2.27	2.45	2.05	2.69
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
2.76	3.11	3.11	3.16	2.99	0.97		
300	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	2.91	3.28	3.41	3.16	3.26	5.48	2.91
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	4.86	4.41	4.32	4.56	5.24	4.38	2.57
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
5.36	4.92	5.33	5.13	5.48	0.93		

외기 조건 -5℃일 경우 300초간 HRV 환기 시스템이 연속으로 작동되는 동안 계군 내 추적가스 평균 제거율은 약 4.38%, 지역별 최대 최저 가스 제거율 차이는 2.57%, 지역 간 표준 편차는 0.93% 수준으로 나타났다. 이때 HRV 환기 시스템의 연속 운전에 있어서 계군 내 평균 온도를 근거로 운영 지침 ±2℃ 조건은 환기 시스템이 작동된 후 22초 이후에 만족하며 이때의 가스 제거율은 약 0.35%, 운영 지침 ±3℃ 조건을 만족하는 27초 이후의 경우 0.35%, 운영 지침 ±5℃을 만족하는 134초 당시의 경우 가스 제거율이 약 2.05% 수준을 보이는 것으로 나타났다.

Table 3.3.33. 11일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃, ±3℃, ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
16 (±2℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.29	0.21
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	0.24	0.21	0.21	0.21	0.29	0.22	0.08
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
0.22	0.21	0.21	0.21	0.25	0.02		
20 (±3℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.35	0.21
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	0.27	0.21	0.21	0.21	0.35	0.24	0.14
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
0.27	0.23	0.23	0.23	0.32	0.04		
71 (±5℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	0.21	0.22	0.21	0.21	0.23	1.81	0.21
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	0.99	1.31	1.12	1.13	1.26	1.01	1.59
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
1.56	1.62	1.81	1.66	1.57	0.62		
300	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	2.78	2.79	3.58	2.93	3.07	5.71	2.78
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	5.10	3.94	4.36	3.95	5.33	4.18	2.93
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
5.04	4.25	5.15	4.76	5.71	0.99		

외기 조건 -15℃일 경우 300초간 HRV 환기 시스템이 연속으로 작동되는 동안 계군 내 추적가스 평균 제거율은 약 4.18%, 지역별 최대 최저 가스 제거율 차이는 2.93%, 지역 간 표준 편차는 0.99% 수준으로 나타났다. 이때 HRV 환기 시스템의 연속 운전에 있어서 계군 내 평균 온도를 근거로 운영 지침 ±2℃ 조건은 환기 시스템이 작동된 후 16초 이후에 만족하며 이때의 가스 제거율은 약 0.22%, 운영 지침 ±3℃ 조건을 만족하는 20초 이후의 경우 0.24%, 운영 지침 ±5℃을 만족하는 71초 당시의 경우 가스 제거율이 약 1.01% 수준을 보이는 것으로 나타났다.

Table 3.3.34. 11일령 조건 시 외기 온도 -25℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃, ±3℃, ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
12 (±2℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.25	0.21
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	0.22	0.21	0.21	0.21	0.25	0.21	0.04
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.01		
16 (±3℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.31	0.21
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	0.24	0.21	0.21	0.21	0.31	0.22	0.10
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
0.22	0.21	0.21	0.21	0.25	0.03		
22 (±5℃)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.49	0.21
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	0.29	0.22	0.22	0.22	0.38	0.30	0.28
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
0.44	0.42	0.42	0.42	0.49	0.11		
300	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.56	2.78	3.15	2.67	3.79	6.59	2.67
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	4.97	3.93	3.83	3.23	5.53	4.20	3.93
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
5.98	4.42	4.68	3.91	6.59	1.16		

외기 조건 -25℃일 경우 300초간 HRV 환기 시스템이 연속으로 작동되는 동안 계군 내 추적가스 평균 제거율은 약 4.20%, 지역별 최대 최저 가스 제거율 차이는 3.93%, 지역 간 표준 편차는 1.16% 수준으로 나타났다. 이때 HRV 환기 시스템의 연속 운전에 있어서 계군 내 평균 온도를 근거로 운영 지침 ±2℃ 조건은 환기 시스템이 작동된 후 12초 이후에 만족하며 이때의 가스 제거율은 약 0.21%, 운영 지침 ±3℃ 조건을 만족하는 16초 이후의 경우 0.22%, 운영 지침 ±5℃을 만족하는 22초 당시의 경우 가스 제거율이 약 0.30% 수준을 보이는 것으로 나타나 가스 제거율 값은 다소 적은 값을 보였다.

25일령 조건일 때 외기 온도 조건에 따른 복합 환기 시스템의 작동 시 가스 제거율은 다음과 같다.

Table 3.3.35. 25일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 복합 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
18 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	5.12	5.92	5.87	5.76	4.11	11.73	4.11
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	5.96	6.94	8.15	6.98	6.31	7.65	7.63
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
9.46	10.55	11.73	10.59	11.24	2.46		
118 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	4.29	4.90	5.13	4.83	4.41	7.54	4.29
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	5.47	6.35	7.05	6.29	6.15	6.04	3.25
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
6.91	6.97	7.31	7.02	7.54	1.11		

HRV 환기 시스템의 경우 3기 모두 연속 운전을 실시하는데 반하여 기존 측면에 설치된 배기팬 및 입기 슬롯을 이용한 일반 환기 시스템은 계군 내 형성되는 온도에 의거하여 주기 운전을 실시하게 된다. 이때 25일령 조건, 외기 온도 -5℃, 운영지침 ±2℃ 기준 일 경우 산출된 주기 운전 값에 의하여 환기 팬이 중지되는 시점의 계군 내 평균 가스 제거율은 약 7.65%, 최고/최저 가스 제거율 간의 편차는 7.63%, 표준 편차는 2.46% 수준이며 환기 팬의 작동이 중지된 후 다시 새로운 환기 주기가 시작되기 바로 직전 당시의 최종 가스 제거율은 6.04%, 최고/최저 가스 제거율 간의 편차는 3.25%, 표준 편차는 1.11% 수준으로 가스 제거율은 약 1.59% 감소한 데 비하여 편차는 4.38% 감소하고 표준 편차 역시 1.35% 가량 감소하여 균일성 측면에서는 다소 상승되는 결과를 보였음을 확인할 수 있었다. 이는 일반 환기 시스템의 작동이 중지되고 HRV 환기 시스템만이 연속 운전 되는 동안 입기 슬롯을 통해 유입된 외기가 기존 계사 내 존재하던 다소 높은 농도의 가스를 포함한 공기층과 혼합이 이루어짐에 따라 지역 간 균일성이 상승된 결과로 판단된다. 외기 온도 -5℃, 운영 지침 ±3℃, ±5℃일 때 지역 별 가스 제거율은 다음과 같다.

Table 3.3.36. 25일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 복합 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
22 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	5.15	6.02	5.85	5.77	4.14	12.82	4.14
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	9.79	11.37	12.22	11.21	10.51	9.46	8.69
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
10.61	11.93	12.82	11.98	12.54	3.11		
144 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	5.30	6.13	6.60	6.00	5.75	8.47	5.30
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	7.20	7.96	7.64	7.41	7.59	7.26	3.18
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
8.11	8.24	8.47	8.04	8.39	1.04		

Table 3.3.37. 25일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 복합 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
84 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	19.60	19.72	19.26	19.65	17.44	23.21	17.44
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	21.72	21.74	23.21	22.15	21.72	20.13	5.78
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
18.59	19.29	19.81	18.45	19.58	1.61		
548 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	19.60	19.72	19.26	19.65	23.72	25.79	22.60
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	21.72	21.74	23.21	22.15	24.63	24.33	3.19
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
18.59	19.29	19.81	18.45	24.95	0.80		

외기 조건 -5℃일 경우 운영 지침 ±3℃일 때 환기 주기가 종료되는 시점에서의 최종 가스 제거율은 7.26%이었으며 운영 지침 ±5℃일 때의 최종 가스 제거율은 24.33%로 타 경우 보다 다소 높은 가스 제거율을 보였다. 이는 84/548초의 상대적

으로 긴 환기 팬 가동/중지 주기에 의한 외기의 절대적인 공급량이 증가하였기 때문으로 판단된다.

Table 3.3.38. 25일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 복합 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
13 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	4.46	4.92	4.94	4.88	3.61	10.19	2.15
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	2.15	2.55	3.45	2.58	2.44	5.44	8.04
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
8.03	8.97	10.19	8.87	9.54	2.88		
84 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.04	3.18	3.19	3.08	3.72	5.81	3.04
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	5.12	5.26	4.71	4.74	4.80	4.61	2.77
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
5.49	5.71	5.74	5.55	5.81	1.07		

이때 25일령 조건, 외기 온도 -15℃, 운영 지침 ±2℃ 기준 일 경우 산출된 주기 운전 값에 의하여 환기 팬이 중지되는 시점의 계군 내 평균 가스 제거율은 약 5.44%, 최고/최저 가스 제거율 간의 편차는 8.04%, 표준 편차는 2.88% 수준이며 환기 팬의 작동이 중지 된 후 다시 새로운 환기 주기가 시작되기 바로 직전 당시의 최종 가스 제거율은 4.61%, 최고/최저 가스 제거율 간의 편차는 2.77%, 표준 편차는 1.07% 수준으로 나타났다. 운영 지침 ±3℃, 운영 지침 ±5℃일 때 가스 제거율은 각각 다음과 같다.

Table 3.3.39. 25일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 복합 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
15 (on time)	3.65	4.39	4.39	4.39	5.33	7.77	3.65
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	3.71	4.35	4.35	4.35	4.05	5.34	4.12
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	6.92	7.77	7.77	7.77	6.94	1.60	
98 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.75	3.90	4.29	3.92	4.38	7.06	3.75
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	5.42	5.80	5.77	5.19	5.73	5.39	3.31
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	6.29	6.57	7.06	6.26	6.54	1.10	

Table 3.3.40. 25일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 복합 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
21 (on time)	5.27	6.01	5.82	5.71	4.16	13.17	4.16
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	10.68	12.11	12.93	11.88	11.37	9.90	9.01
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	11.46	12.44	13.17	12.40	13.12	3.39	
137 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	5.82	6.09	6.41	6.40	6.32	8.65	5.82
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	7.00	7.72	7.82	7.16	8.34	7.32	2.83
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	7.78	8.11	8.65	8.29	7.85	0.92	

외기 조건 -15℃일 경우 운영 지침 ±3℃일 때 환기 주기가 종료되는 시점에서의

최종 가스 제거율은 5.39%이었으며 운영 지침 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 일 때의 최종 가스 제거율은 7.32%로 산정되었다.

Table 3.3.41. 25일령 조건 시 외기 온도 -25°C , 운영기준이 기준온도 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 일 때 복합 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
10 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.54	3.76	3.78	3.77	3.00	8.10	0.80
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	0.80	0.95	1.50	0.96	0.99	3.86	7.30
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	5.97	6.82	8.10	6.68	7.35	2.57	
66 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	2.60	2.95	2.92	2.91	2.98	6.02	2.60
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	3.48	4.53	4.61	4.34	3.31	4.15	3.42
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	5.28	5.67	6.02	5.75	4.89	1.20	

이때 25일령 조건, 외기 온도 -25°C , 운영 지침 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 기준 일 경우 산출된 주기 운전 값에 의하여 환기 팬이 중지되는 시점의 계군 내 평균 가스 제거율은 약 3.86%, 최고/최저 가스 제거율 간의 편차는 7.30%, 표준 편차는 2.57% 수준이며 환기 팬의 작동이 중지 된 후 다시 새로운 환기 주기가 시작되기 바로 직전 당시의 최종 가스 제거율은 4.15%, 최고/최저 가스 제거율 간의 편차는 3.42%, 표준 편차는 1.20% 수준으로 나타났다. 운영 지침 $\pm 3^{\circ}\text{C}$, 운영 지침 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 일 때 가스 제거율은 각각 다음과 같다.

Table 3.3.42. 25일령 조건 시 외기 온도 -25℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 복합 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
12 (on time)	4.69	5.25	5.20	5.19	3.95	10.93	2.71
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	2.71	3.18	4.11	3.20	2.98	6.00	8.22
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	8.85	9.76	10.93	9.70	10.30	3.00	
79 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.32	2.92	3.06	2.90	4.23	6.24	2.90
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	4.35	4.52	5.56	4.55	4.54	4.58	3.35
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	5.72	5.65	6.24	5.62	5.52	1.13	

Table 3.3.43. 25일령 조건 시 외기 온도 -25℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 복합 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율 (HRV 시스템은 연속 운전)

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
15 (on time)	5.32	6.22	6.04	6.05	4.47	12.86	4.47
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	6.94	7.98	9.04	7.94	7.18	8.48	8.39
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	10.88	11.87	12.86	11.91	12.47	2.83	
98 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	4.63	4.51	4.81	4.52	5.10	7.17	4.51
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	5.33	5.83	5.62	5.70	6.03	5.67	2.66
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	5.96	6.77	7.17	6.89	6.22	0.86	

외기 조건 -25℃일 경우 운영 지침 ±3℃일 때 환기 주기가 종료되는 시점에서의

최종 가스 제거율은 4.58%이었으며 운영 지침 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 일 때의 최종 가스 제거율은 5.67%로 산정되었다.

3가지 외기 조건 별 환기 운영 지침에 따른 가스 제거율을 종합하면 운영 지침의 허용 폭이 클수록 환기 팬의 작동 시간이 늘어나고 그에 따라 가스 제거율 또한 상승하는 경향을 보여준다. 또한 외기 온도가 낮을수록 낮은 가스 제거율을 보이는데 이는 환기 팬 가동 시간의 감소에 기인한 결과이다. 이에 계군에서의 암모니아 혹은 기타 유해가스의 시간당 발생율을 적용하면 환기 팬 작동 유무에 따른 내부 유해 가스 농도를 추정할 수 있으리라 판단된다.

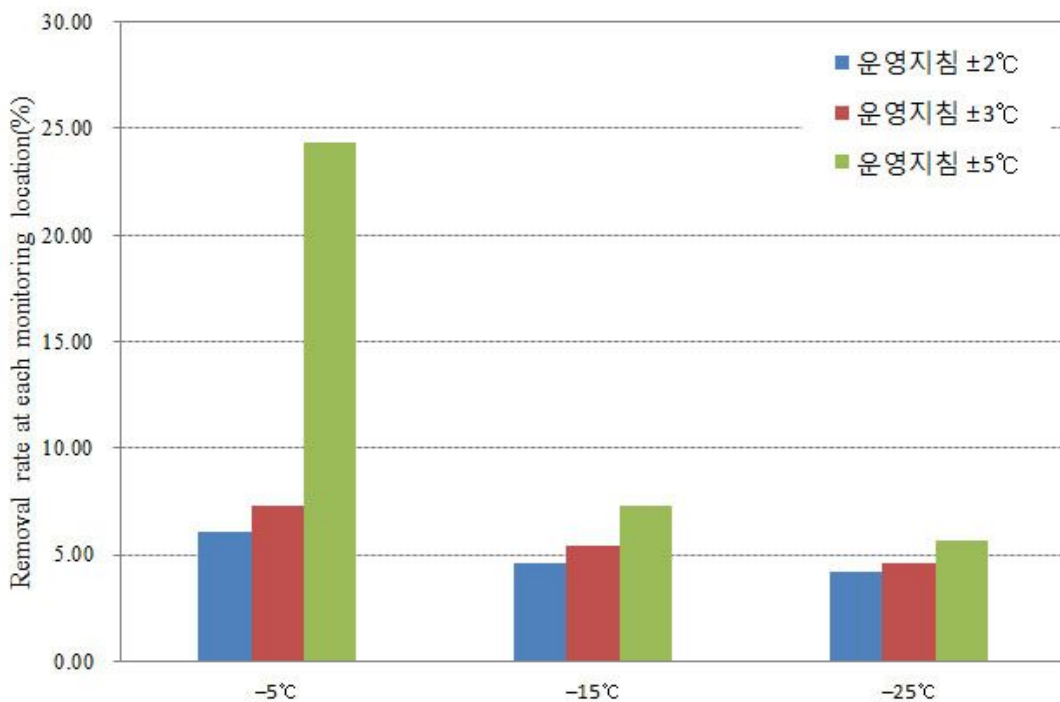


Fig. 3.3.15. 25일령 기준 외기 온도 및 계사 환기 운영 지침 조건에 따른 가스 제거율 (%)

5. 국내 일반 강제 환기식 육계사의 계군 내 적정 열환경 조성을 위한 환경 조건 별 운영 주기 도출

가. 11일령 환경 조건 시 환기 시스템 on/off 주기 도출

동절기 육계 11일령 기준, 기존 일반 강제 환기 시스템 즉, 크로스 팬을 이용한 음압식 배기, 측벽 슬롯을 통한 입기 방식의 계사 내부 적정 열환경 조성을 위한 환기 운전 시간 도출을 위하여 각 설계 변수에 따라 전산유체역학 시뮬레이션 연산 및 해석을 수행하였다. 환기 시스템은 다섯 개의 측벽 배기팬(30,000 CMH)을 모두

가동하고, 시설 내부에 발생하는 음압의 크기에 따라 측벽 상단에 위치하는 슬롯을 통하여 외기가 유입된다. 환기팬 작동 시간 산출에 앞서, 작동에 따른 계군 내 열환경 변화를 모의하고 운영 지침에 따른 환기 시스템의 적정 “on time” 산출을 위하여 환기 팬이 작동된 후 1분간의 상황에 대한 시뮬레이션 연산을 수행하였다.

계군 내 영역별 열환경 분석을 위한 구획은 다음 그림과 같다.

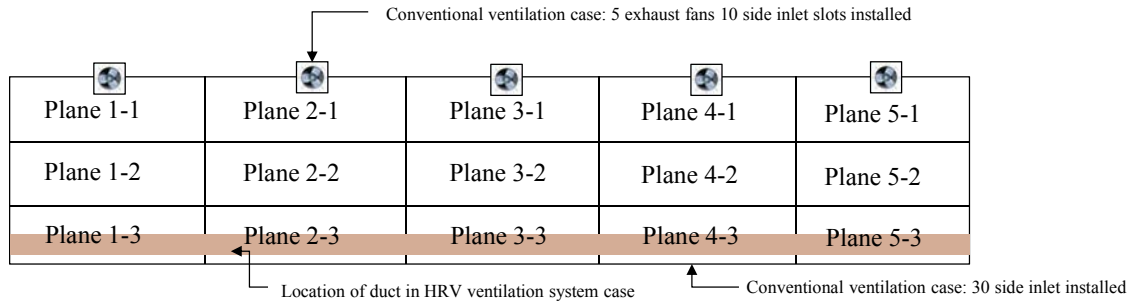


Fig. 3.3.16. 영역별 열환경 분석을 위한 구획 지정 (계군 높이=40cm)

외기온이 각각 영하 5, 15, 25℃ 일 때 환기 시스템 작동에 따른 영역별 온도 변화 추이는 각각 다음과과 같다.

Table 3.3.44. 외기 조건 -5℃, 환기 시스템을 연속 운전할 경우 영역별 온도 분포
(Unit: ℃)

time sec.	location of plane									ave.	max	min	diff.
	1-1	1-2	1-3	2-1	...	4-3	5-1	5-2	5-3				
1	27.4	27.5	27.4	27.4	...	27.4	27.4	27.5	27.4	27.4	27.5	27.4	0.2
2	27.3	27.5	27.3	27.3	...	27.3	27.3	27.5	27.3	27.4	27.6	27.3	0.3
3	27.2	27.5	27.2	27.3	...	27.3	27.2	27.5	27.2	27.4	27.6	27.2	0.4
4	27.2	27.5	27.1	27.3	...	27.2	27.1	27.5	27.1	27.3	27.7	27.1	0.5
5	27.1	27.5	27.1	27.3	...	27.2	27.1	27.5	27.1	27.3	27.7	27.1	0.6
6	27.0	27.6	27.0	27.2	...	27.2	26.9	27.5	27.0	27.3	27.7	26.9	0.8
7	26.9	27.6	26.9	27.1	...	27.1	26.7	27.5	26.9	27.2	27.8	26.7	1.1
8	26.7	27.6	26.8	27.0	...	27.0	26.4	27.5	26.8	27.1	27.9	26.4	1.4
9	26.4	27.6	26.5	26.7	...	26.7	26.0	27.5	26.5	27.0	27.9	26.0	1.9
10	26.0	27.6	26.1	26.3	...	26.3	25.6	27.4	26.1	26.7	28.0	25.6	2.4
11	25.6	27.5	25.5	25.9	...	25.7	25.2	27.3	25.5	26.4	28.0	25.2	2.8
12	25.2	27.3	24.9	25.6	...	25.0	24.8	27.1	24.9	26.0	27.8	24.8	3.0
13	24.9	27.0	24.3	25.2	...	24.3	24.4	26.8	24.3	25.5	27.5	24.3	3.3
14	24.6	26.6	23.7	24.9	...	23.7	24.1	26.3	23.7	25.1	27.1	23.7	3.4
15	24.3	26.0	23.1	24.6	...	23.1	23.9	25.7	23.1	24.6	26.5	23.1	3.3
16	24.1	25.4	22.7	24.4	...	22.7	23.6	25.1	22.7	24.2	25.8	22.7	3.1
17	24.0	24.8	22.4	24.2	...	22.4	23.5	24.5	22.4	23.8	25.1	22.4	2.8
18	23.9	24.2	22.1	24.1	...	22.1	23.3	24.0	22.1	23.4	24.5	22.1	2.4
19	23.8	23.8	21.9	24.0	...	21.9	23.2	23.5	21.9	23.2	24.0	21.9	2.2
20	23.7	23.4	21.7	23.9	...	21.6	23.1	23.2	21.7	22.9	23.9	21.6	2.2
21	23.7	23.1	21.5	23.8	...	21.5	23.0	22.9	21.5	22.8	23.8	21.5	2.3
22	23.6	22.8	21.3	23.7	...	21.3	22.9	22.7	21.3	22.6	23.7	21.3	2.4
23	23.5	22.6	21.2	23.7	...	21.2	22.7	22.5	21.2	22.5	23.7	21.2	2.5
24	23.5	22.4	21.1	23.6	...	21.1	22.6	22.3	21.1	22.3	23.6	21.1	2.5
25	23.4	22.2	20.9	23.5	...	21.0	22.5	22.2	21.0	22.2	23.5	20.9	2.6
.
.
.
59	20.5	19.3	19.2	20.6	...	19.6	20.0	19.0	19.0	19.8	20.6	19.0	1.6
60	20.4	19.2	19.1	20.5	...	19.6	19.9	18.9	18.9	19.7	20.5	18.9	1.6

Table 3.3.45. 외기 조건 -15℃, 환기 시스템을 연속 운전할 경우 영역별 온도 분포
(Unit: ℃)

time sec.	location of plane									ave.	ma x	min	diff.
	1-1	1-2	1-3	2-1	...	4-3	5-1	5-2	5-3				
1	27.3	27.5	27.3	27.4	...	27.4	27.3	27.5	27.3	27.4	27.5	27.3	0.2
2	27.2	27.5	27.2	27.3	...	27.3	27.2	27.5	27.2	27.3	27.6	27.2	0.4
3	27.1	27.5	27.0	27.2	...	27.2	27.1	27.5	27.0	27.3	27.6	27.0	0.6
4	27.0	27.5	26.9	27.2	...	27.1	26.9	27.5	26.9	27.2	27.7	26.9	0.7
5	26.9	27.5	26.8	27.1	...	27.0	26.8	27.5	26.8	27.2	27.7	26.8	1.0
6	26.7	27.5	26.7	26.9	...	26.9	26.4	27.4	26.7	27.1	27.8	26.4	1.3
7	26.3	27.4	26.4	26.6	...	26.6	25.9	27.4	26.4	26.9	27.8	25.9	1.9
8	25.8	27.4	25.9	26.2	...	26.1	25.4	27.3	25.9	26.5	27.9	25.4	2.5
9	25.2	27.4	25.2	25.6	...	25.3	24.7	27.2	25.2	26.1	27.9	24.7	3.2
10	24.7	27.2	24.2	25.1	...	24.3	24.1	27.0	24.2	25.5	27.8	24.1	3.6
11	24.2	26.8	23.3	24.5	...	23.3	23.6	26.5	23.3	24.9	27.4	23.3	4.1
12	23.7	26.2	22.4	24.1	...	22.4	23.1	25.9	22.4	24.3	26.8	22.4	4.4
13	23.4	25.5	21.7	23.7	...	21.7	22.7	25.2	21.7	23.6	26.1	21.7	4.4
14	23.1	24.7	21.1	23.4	...	21.1	22.4	24.3	21.1	23.1	25.2	21.1	4.1
15	22.9	23.9	20.6	23.1	...	20.6	22.1	23.5	20.6	22.5	24.3	20.6	3.7
16	22.7	23.1	20.2	22.9	...	20.3	21.9	22.8	20.2	22.1	23.5	20.2	3.3
17	22.6	22.5	19.9	22.8	...	19.9	21.7	22.2	19.9	21.7	22.9	19.9	3.0
18	22.5	22.0	19.6	22.6	...	19.7	21.5	21.7	19.6	21.4	22.6	19.6	3.0
19	22.4	21.6	19.4	22.5	...	19.4	21.4	21.3	19.4	21.1	22.5	19.4	3.1
20	22.2	21.2	19.1	22.4	...	19.2	21.2	21.0	19.2	20.9	22.4	19.1	3.2
21	22.1	20.9	18.9	22.2	...	19.1	21.0	20.7	19.0	20.7	22.2	18.9	3.3
22	22.0	20.6	18.8	22.1	...	18.9	20.8	20.5	18.8	20.5	22.1	18.8	3.4
23	21.9	20.3	18.6	22.0	...	18.8	20.6	20.2	18.6	20.3	22.0	18.6	3.4
24	21.7	20.0	18.4	21.8	...	18.7	20.4	20.0	18.5	20.2	21.8	18.4	3.4
25	21.5	19.8	18.3	21.6	...	18.6	20.2	19.7	18.3	20.0	21.6	18.3	3.3
.
.
.
59	16.8	16.0	15.5	17.2	...	16.0	16.3	15.6	15.2	16.3	17.2	15.2	2.0
60	16.7	15.9	15.3	17.1	...	15.9	16.2	15.5	15.0	16.2	17.1	15.0	2.1

Table 3.3.46. 외기 조건 -25℃, 환기 시스템을 연속 운전할 경우 영역별 온도 분포
(Unit: ℃)

time sec.	location of plane									ave.	ma x	min	diff.
	1-1	1-2	1-3	2-1	...	4-3	5-1	5-2	5-3				
1	27.2	27.5	27.2	27.3	...	27.3	27.2	27.5	27.2	27.4	27.5	27.2	0.3
2	27.1	27.4	27.1	27.2	...	27.2	27.1	27.4	27.1	27.3	27.6	27.1	0.5
3	26.9	27.4	26.9	27.1	...	27.1	26.9	27.4	26.9	27.2	27.6	26.9	0.7
4	26.8	27.4	26.7	27.0	...	27.0	26.7	27.4	26.7	27.1	27.7	26.7	1.0
5	26.5	27.4	26.5	26.8	...	26.8	26.3	27.4	26.5	27.0	27.7	26.3	1.4
6	26.1	27.4	26.2	26.5	...	26.4	25.7	27.3	26.2	26.7	27.8	25.7	2.1
7	25.4	27.3	25.5	25.8	...	25.7	24.9	27.2	25.5	26.3	27.8	24.9	2.9
8	24.7	27.2	24.5	25.1	...	24.6	24.1	27.0	24.5	25.6	27.8	24.1	3.7
9	23.9	26.9	23.2	24.3	...	23.3	23.3	26.6	23.2	24.8	27.6	23.2	4.4
10	23.3	26.3	21.9	23.7	...	21.9	22.5	26.0	21.9	24.0	27.0	21.9	5.1
11	22.7	25.5	20.8	23.1	...	20.8	21.9	25.1	20.8	23.2	26.2	20.8	5.4
12	22.3	24.5	19.9	22.6	...	19.9	21.4	24.1	19.9	22.4	25.2	19.9	5.3
13	21.9	23.5	19.2	22.2	...	19.2	21.0	23.0	19.2	21.6	24.1	19.2	4.9
14	21.7	22.5	18.6	21.9	...	18.7	20.7	22.0	18.6	21.0	23.0	18.6	4.4
15	21.5	21.6	18.2	21.7	...	18.2	20.4	21.2	18.2	20.5	22.1	18.2	3.9
16	21.3	20.9	17.8	21.5	...	17.8	20.1	20.5	17.8	20.0	21.5	17.8	3.7
17	21.1	20.3	17.4	21.3	...	17.5	19.9	20.0	17.4	19.7	21.3	17.4	3.9
18	21.0	19.8	17.1	21.1	...	17.2	19.6	19.5	17.1	19.3	21.1	17.1	4.0
19	20.8	19.3	16.8	20.9	...	17.0	19.4	19.1	16.8	19.0	20.9	16.8	4.1
20	20.6	18.9	16.5	20.7	...	16.8	19.1	18.7	16.5	18.8	20.7	16.5	4.2
21	20.4	18.5	16.3	20.5	...	16.7	18.8	18.4	16.3	18.5	20.5	16.3	4.2
22	20.1	18.1	16.1	20.2	...	16.5	18.5	18.0	16.1	18.3	20.2	16.1	4.1
23	19.9	17.8	16.0	20.0	...	16.4	18.3	17.7	16.0	18.0	20.0	16.0	4.0
24	19.6	17.5	15.9	19.7	...	16.3	18.0	17.4	15.9	17.8	19.7	15.9	3.9
25	19.3	17.2	15.8	19.5	...	16.2	17.8	17.2	15.7	17.6	19.5	15.7	3.7
.
.
.
59	13.2	12.4	11.5	13.6	...	12.1	12.6	11.8	11.0	12.6	13.7	11.0	2.6
60	13.1	12.2	11.3	13.5	...	11.9	12.5	11.7	10.9	12.5	13.6	10.9	2.7

외기온이 영하 5℃인 경우, 운영 조건을 계사 운영자의 계군 기대 온도 즉, 11일령의 경우 27.5℃를 기준으로 ±2℃를 계군 생육 온도로 설정할 경우 영역 별 평균 온도를 토대로 환기가 시작된 후 13초 후, 적정 온도 최저치에 도달하는 것으로 나타났으며, ±3℃가 기준일 경우 15초, ±5℃가 기준일 경우에는 23초인 것으로 나타났다. 이때 각 영역별 최고 온도 및 최저 온도와의 편차는 각각 3.3℃, 3.3℃, 2.5℃ 인 것으로 나타났다. 각각의 시간을 운영기준에 부합되는 계군 생육 온도 설정을 위한 환기 시스템의 작동 시간 “on time”이라고 정의할 때, 환기 시스템이 정지되었다가 다시 작동되기 이전까지의 시간 즉 “off time”을 산출하기 위하여 목표 환기량 대비 전체 팬 환기량 값을 이용하여 산출한 외기 온도 대비 각 운영 조건에 따른 환기 시스템 가동 / 중지 시간은 다음과 같다.

Table 3.3.47. 11일령 조건 시 외기 온도 대비 운영 기준에 따른 환기 시스템 on/off
(Unit: sec.)

Outdoor temp.	ventilation	±2℃		±3℃		±5℃	
-5℃	fan (on)	13	77	15	88	23	135
	fan (off)	64		73		112	
-15℃	fan (on)	10	59	12	71	15	88
	fan (off)	49		59		73	
-25℃	fan (on)	8	47	9	53	12	71
	fan (off)	39		44		59	

즉, 연구 대상 육계사와 동일한 환기 시스템 형태를 지닌 구조에 대하여 건물의 노후화 등에 따른 틈새 누출이 없다고 가정할 경우, 주어진 외기 온도에 따라 계사 운영주의 난방 운영 기준에 맞추어 각각 환기 시스템의 가동 및 중지 시간을 상기 표와 같이 제시할 수 있다.

11일령 설계 환기량 기준, 외기 조건 및 운영 지침 조건 별 환기 시스템의 작동/중지에 따른 계군 내 평균 온도 변화 추이는 각각 다음 그림과 같다.

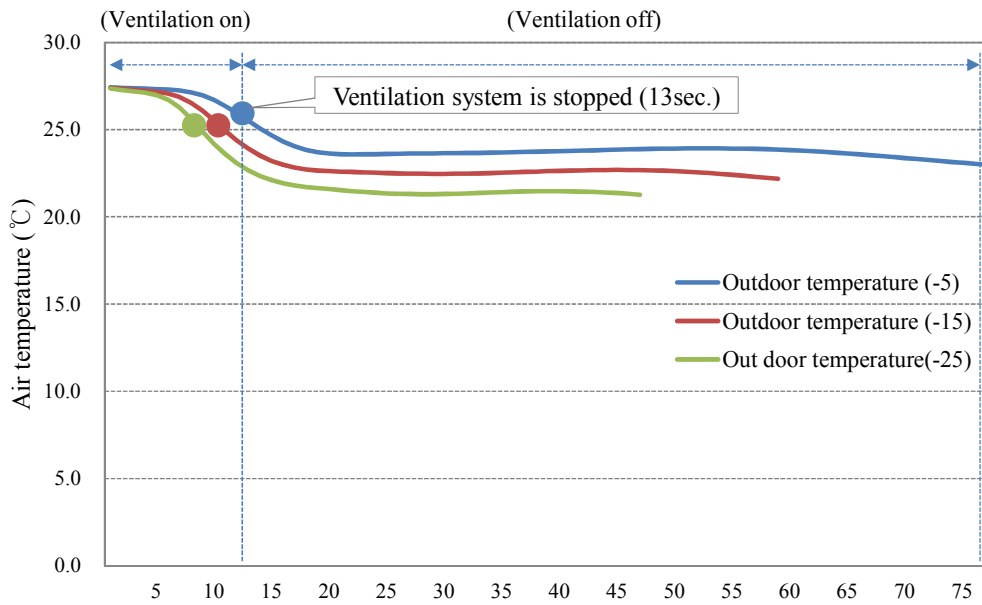


Fig. 3.3.17. 11일령 조건 시 운영 기준이 설계 기준 온도 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 일 때 환기 시스템 가동 및 중지 에 따른 계군 내 평균 온도 변화 추이

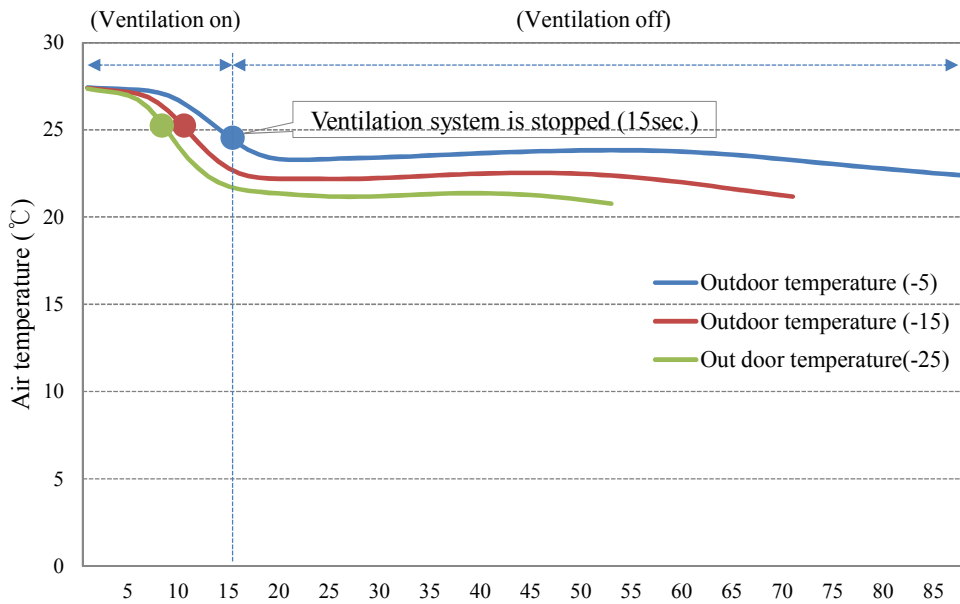


Fig. 3.3.18. 11일령 조건 시 운영 기준이 설계 기준 온도 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 일 때 환기 시스템 가동 및 중지 에 따른 계군 내 평균 온도 변화 추이

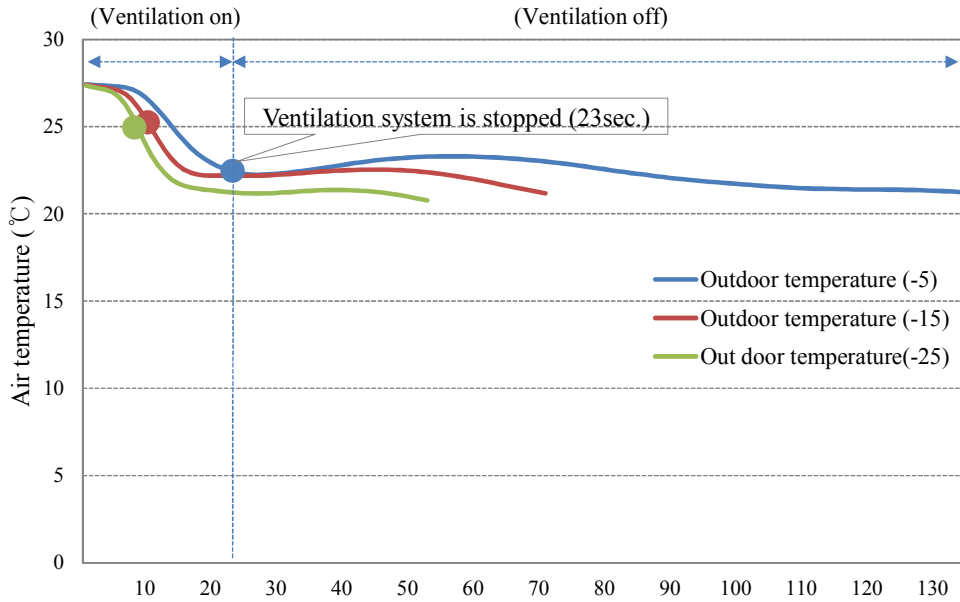


Fig. 3.3.19. 11일령 조건 시 운영 기준이 설계 기준 온도 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 일 때 환기 시스템 가동 및 중지 에 따른 계군 내 평균 온도 변화 추이

외기 온도가 -5°C 일 때 각 운영 기준에 따른 지역별 온도 분포는 다음과 같다.

Table 3.3.48. 11일령 조건 시 외기 온도 -5°C , 운영기준이 기준온도 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location ($^{\circ}\text{C}$)						
13 on time	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max..	Min.
	24.9	25.2	25.2	25.2	24.4	27.5	24.3
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	27.0	27.5	27.5	27.5	26.8	25.5	3.3
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	1.4	
77 off time	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	22.1	22.8	22.8	22.8	22.0	24.2	22.0
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	23.2	24.2	24.2	24.2	23.2	23.0	2.2
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	22.4	23.0	23.0	23.0	22.2	0.7	

외기 조건이 -5°C , 설계 운영 조건이 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 일 때, 시뮬레이션 연산을 통하여 산출된 환기팬 작동 시간은 13초이며, 환기팬 작동 중지 시간은 77초로 총 88초의 환기 싸이클을 산출하였다. 상기 조건일 때 환기 시스템이 작동 된 후 종료 되는 순간의 평균 온도는 25.5°C 로 설계 운영 조건에 부합되었으며 지역별 최고 및 최소 온도차는 약 3.3°C , 표준 편차는 1.4°C 로 나타났다. 이후 환기 시스템의 작동이 중지된 후 77초가 지난 후 내부 평균 온도는 23.0°C 로 약 2.5°C 가량 하락하였고 온도 편차는 2.2°C 로 약 1.1°C 감소, 표준 편차는 0.7°C 로 나타났다. 이는 차가운 외기의 공급이 중단됨에 따라 이미 시설 내부로 유입된 차가운 외기가 계군 내 공기의 온도 평균값을 하락시키는 반면 77초 동안 지역별로 공기가 혼합됨에 따라 편차는 감소되었기 때문으로 판단된다. 또한 배기팬이 위치하는 n-1 행에 비하여 입기 슬롯의 개수가 더 많은 n-3 행에서 약 0.68°C 낮은 온도 분포를 보였다. 따라서 입기 슬롯의 개수가 많은 n-3 행 구역에 대한 추가 열원 공급이 필요할 것으로 사료된다.

Table 3.3.49. 11일령 조건 시 외기 온도 -5°C , 운영기준이 기준온도 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location ($^{\circ}\text{C}$)						
15 on time	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	24.3	24.6	24.6	24.6	23.9	26.5	23.1
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave..	Diff.
	26.0	26.5	26.5	26.5	25.7	24.6	3.3
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	1.3		
88 off time	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	21.4	22.2	22.2	22.3	21.1	23.8	21.1
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave..	Diff.
	22.7	23.7	23.7	23.8	22.6	22.4	2.7
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
21.6	22.3	22.3	22.3	21.5	0.8		

앞선 운영 지침 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 기준과 마찬가지로 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 의 경우 평균 온도는 2.2°C 가량 하락하였으나 최고 온도 및 최소 온도 간의 편차 값은 0.6°C 하락, 지역 별 표준 편차 역시 0.5°C 하락하는 결과를 보였다. 또한 n-1 행에 비하여 입기 슬롯의 개수가 많은 n-3 행에서 낮은 온도 분포를 보여 이 구획에 대한 집중적인 열관리가 필요할 것으로

로 사료된다.

Table 3.3.50. 11일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
23 on time	23.5	23.7	23.7	21.9	22.7	23.7	21.2
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave..	Diff.
	22.6	22.9	22.9	22.9	22.5	22.5	2.5
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	21.2	21.2	21.2	21.2	21.2	1.0	
135 off time	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	20.3	21.4	21.2	21.3	20.3	22.5	20.2
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave..	Diff.
	21.0	22.5	22.4	22.5	20.9	21.2	2.3
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
20.4	21.4	21.3	21.4	20.2	0.8		

운영 지침 ±5℃의 경우 평균 온도는 1.3℃가량 하락하였으나 최고 온도 및 최소 온도 간의 편차 값은 0.2℃하락, 지역 별 표준 편차 역시 0.2℃ 하락하는 결과를 보였다.

외기 조건 -5℃일 때 운영 지침에 따른 환기 시스템의 작동/중지에 따른 계군 높이 즉, 바닥으로부터 40cm 높이에서의 열환경 분포는 다음 그림과 같다. 환기 시스템이 작동되는 동안에는 입기 슬롯으로부터 외기가 유입되는 구역의 경우 상대적으로 낮은 온도 분포 인한 온도 불균일성을 형성하여 닭의 쏠림 현상 및 호흡기성 질병에 대한 노출이 증가 될 수 있을 것이라 사료된다. 환기 시스템의 작동이 중지되는 동안 환기 시스템이 작동될 때와 비교하여 정성적인 열환경 분포를 토대로 상대적으로 공기층의 열교환이 이루어지는 것으로 판단할 수 있다.

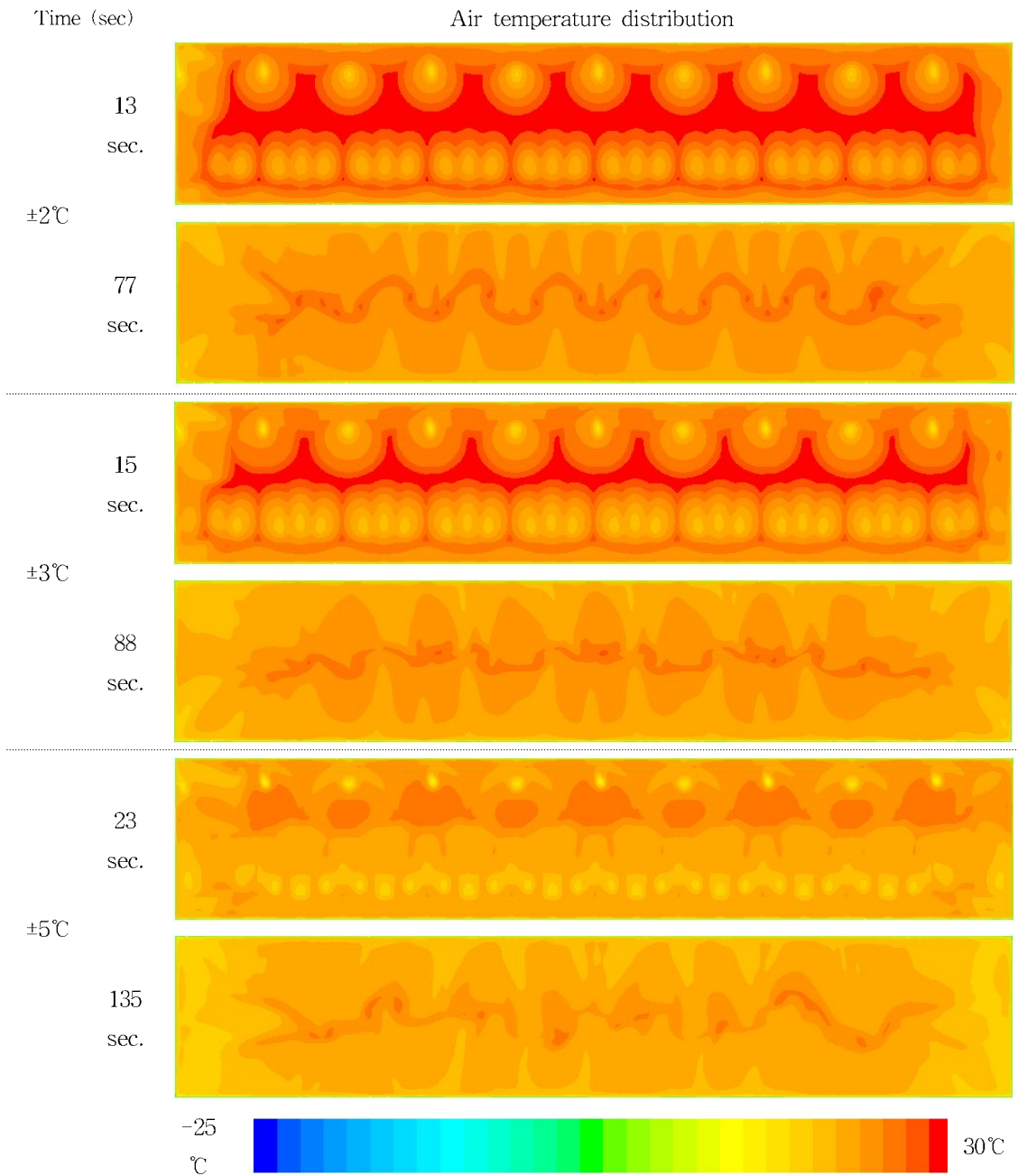


Fig. 3.3.20. 외기 온도 -5°C일 때 운영 지침 별 환기 시스템 작동/중지에 따른 계군 높이(40cm) 열환경 분포

외기 조건이 -15°C일 때 각 운영 지침에 따른 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포는 다음과 같다.

Table 3.3.51. 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
10 (on time)	24.7	25.1	25.1	25.1	24.1	27.8	24.1
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	27.2	27.8	27.8	27.8	27.0	25.5	3.6
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	24.2	24.3	24.3	24.3	24.2	1.5	
59 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	21.0	22.1	22.1	22.1	21.1	23.3	21.0
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	22.1	23.3	23.3	23.3	22.1	22.2	2.3
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	21.5	22.4	22.4	22.4	21.4	0.7	

운영 지침이 ±2℃인 경우 환기 시스템의 작동 / 중지 여부에 대하여 69초의 환기 시스템 운전 사이클이 종료되는 시점에 약 3.3℃의 온도 하락을 보이는 반면 온도 균일성은 약간 상승하는 것으로 나타났다. 이는 환기 시스템의 작동이 중지됨에 따라 외기의 유입이 이루어지지 않고 내부의 공기 간의 혼합이 이루어지기 때문으로 사료된다. 앞선 외기 온도 -5℃결과와 마찬가지로, n-1 보다 n-3 구역에서 낮은 온도 분포를 보이고 있으며 환기 시스템이 작동되는 동안 벽 인근에서 열환경 관리에 주의를 기울여야 될 것으로 판단된다. 환기 시스템의 동작이 멈춘 후에는 이러한 폭 방향에 따른 온도 편차는 줄어드는 것으로 나타났다.

Table 3.3.52. 11일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
12 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	23.7	24.1	24.1	24.1	23.1	26.8	22.4
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	26.2	26.8	26.8	26.8	25.9	24.3	4.4
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	1.8	
71 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	20.1	20.9	20.8	20.8	19.8	22.6	19.8
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	21.0	22.6	22.6	22.6	21.0	21.2	2.8
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	20.5	21.5	21.5	21.6	20.4	0.9	

Table 3.3.53. 11일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
15 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	22.9	23.1	23.1	23.1	22.1	24.3	20.6
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	23.9	24.3	24.3	24.3	23.5	22.5	3.7
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6	1.5	
88 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	18.9	19.6	19.6	19.7	18.6	21.5	18.6
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	20.2	21.5	21.5	21.5	19.9	20.0	2.9
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	19.1	20.6	20.5	20.5	18.9	1.0	

운영 지침이 $\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 인 경우 앞선 경우와 마찬가지로 환기 시스템이 작동되는 동안 폭 방향에 따른 온도 불균일성이 발견되었다. 이는 입기 슬롯을 이용하는 강제 환기 시스템에서 불가피한 결과로써 입기 슬롯으로부터 외기가 계군내로 떨어지는 구역에 대한 집중적인 열관리가 필요할 것으로 사료된다.

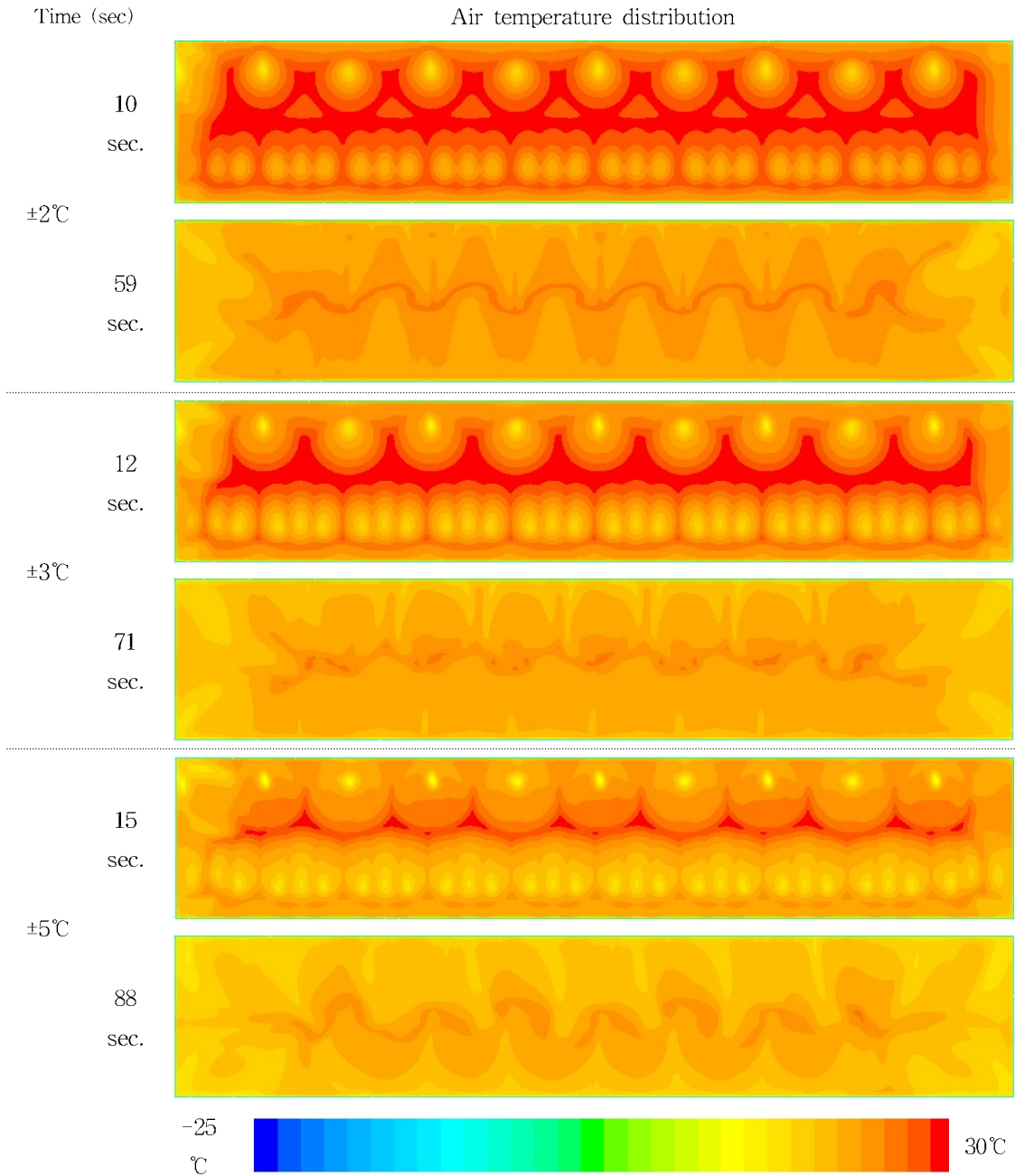


Fig. 3.3.21. 외기 온도 -15°C 일 때 운영 지침 별 환기 시스템 작동/중지에 따른 계군 높이(40cm) 열환경 분포

외기 조건이 -25℃일 때 각 운영 지침에 따른 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포는 다음과 같다. 앞선 외기 조건 및 운영 지침 조건 결과와 마찬가지로 환기 시스템이 작동되는 동안 폭방향 온도 구배가 발생하며 환기 시스템의 작동이 중지 될 때 열교환에 의한 열적 균일성 향상이 일어나는 것을 발견할 수 있다.

Table 3.3.54. 11일령 조건 시 외기 온도 -25℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
8 (on time)	24.7	25.1	25.1	25.1	24.1	27.8	24.1
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	27.2	27.8	27.8	27.8	27.0	25.6	3.7
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	24.5	24.6	24.6	24.6	24.5	1.4	
47 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	20.2	21.4	21.5	21.5	20.1	22.2	20.1
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	20.9	22.2	22.2	22.2	20.8	21.3	2.1
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	20.6	21.7	21.7	21.7	20.5	0.7	

Table 3.3.55. 11일령 조건 시 외기 온도 - 25℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
9 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	23.9	24.3	24.4	24.4	23.3	27.6	23.2
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	26.9	27.6	27.6	27.6	26.6	24.8	4.4
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	23.2	23.3	23.3	23.3	23.2	1.8	
53 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	19.3	20.8	20.8	20.8	19.5	21.9	19.3
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	20.4	21.9	21.9	21.9	20.4	20.8	2.6
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	20.0	21.2	21.2	21.2	19.9	0.8	

Table 3.3.56. 11일령 조건 시 외기 온도 - 25℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
12 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	22.3	22.6	22.6	22.6	21.4	25.2	19.9
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	24.5	25.2	25.2	25.2	24.1	22.4	5.3
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9	2.1	
71 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	17.4	18.5	18.5	18.6	16.9	20.7	16.9
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	18.5	20.6	20.7	20.7	18.4	18.9	3.8
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	18.0	19.6	19.5	19.5	17.8	1.2	

외기 조건이 -25°C 일 때 운영 지침에 따른 지역 별 열환경 정성적 결과는 다음과 같다.

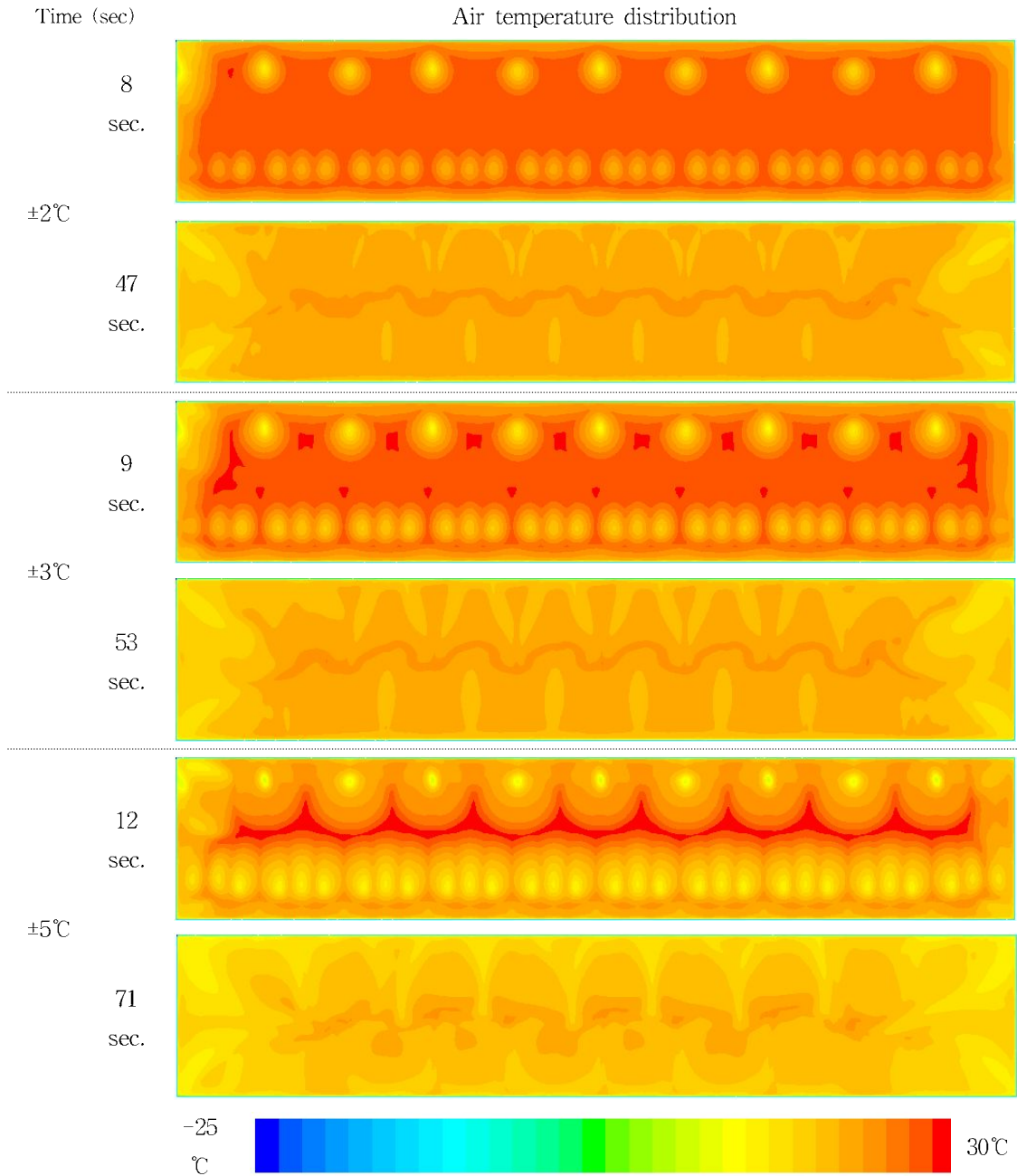


Fig. 3.3.22. 외기 온도 -25°C 일 때 운영 지침 별 환기 시스템 작동/중지에 따른 계군 높이(40cm) 열환경 분포

11일령 설계 환기량에 대한 각 조건에 대하여 생육 걱정 온도를 기준으로 온도

적정성을 평가하기 위하여 전산유체역학 메인 모듈인 FLUENT를 이용하여 바닥으로부터 40cm 떨어져 있는 평면 즉 가상의 계군에 대한 열환경 분포를 파악하고자 하였다. 이를 위하여 해당 평면에서의 수치 해석을 위한 각각의 cell로부터의 온도 값을 추출하여 각 운영 기준 운영 지침에 어느 정도 부합되는지를 평가하고자 하였다. 이때 벽체에서의 전도 열손실로 균일성이 과소 평가되는 것을 방지하기 위하여 사방의 측벽으로부터 20cm 떨어진 평면 cell에서의 온도 값을 추출하고자 하였다. 이에 대한 결과는 다음 표와 같다. 퍼센트로 표현되는 값은 전체 각 cell에 대한 온도 값 대비 해당 기준에 부합되는 cell의 비율로써 균일성 및 적정성을 평가하기 위한 임의 지표이다.

Table 3.3.57. 11일령 조건 시 계군 cell에서 추출한 온도값을 토대로 한 적정성 평가
(운영 지침: $\pm 2^{\circ}\text{C}$)

Outdoor air temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Ventilation on	Ventilation off
-5	49.6%	3.7%
-15	55.9%	0.4%
-25	62.2%	0.0%

운영 지침을 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 적용할 경우 -5°C 외기 조건일 경우 환기 시스템 작동 시간 후에는 약 49.6%의 비율로 적정 온도 범위에 만족하며 환기 시스템의 작동이 중지된 후 즉 “off time”이 적용될 동안 계군 내 공기 온도 값이 하락하면서 약 3.7%의 비율로 기준 온도에 만족하는 것으로 나타났다. -15°C 및 -25°C 의 외기 조건의 경우에도 마찬가지로 환기 시스템의 작동이 중지된 후, 계사 내부 온도 하락현상으로 인하여 해당 운영 지침에 부합되는 적정 온도를 갖는 영역이 줄어들어는 것으로 나타났다. 따라서 열풍기 등의 추가적인 열원의 공급이 필수적일 것이라 판단된다.

Table 3.3.58. 11일령 조건 시 계군 cell에서 추출한 온도값을 토대로 한 적정성 평가
(운영 지침: $\pm 3^{\circ}\text{C}$)

Outdoor air temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Ventilation on	Ventilation off
-5	48.9%	5.8%
-15	43.9%	0.9%
-25	58.5%	0.0%

Table 3.3.59. 11일령 조건 시 계군 cell에서 추출한 온도값을 토대로 한 적정성 평가
(운영 지침: $\pm 5^{\circ}\text{C}$)

Outdoor air temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Ventilation on	Ventilation off
-5	41.6%	14.6%
-15	46.6%	6.3%
-25	45.1%	1.0%

운영 지침 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 및 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 역시 환기 시스템의 작동이 중지 된 후 적정 온도 범위를 만족하는 비율이 급격하게 감소하는 것으로 나타나 기준 열환경을 만족시키기 위한 추가적인 열원의 필요성을 시사하고 있다.

나. 25일령 환경 조건 시 환기 시스템 on/off 주기 도출

동절기 육계 25일령 기준, 기존 일반 강제 환기 시스템의 계사 내부 적정 열환경 조성을 위한 환기 운전 시간 도출을 위하여 각 설계 변수에 따라 전산유체역학 시뮬레이션 연산 및 해석을 수행하였다. (주) 하림에서 제공하는 25일령 기준 적정 설계 환기 요구량은 13,600 CMH 이므로 다섯 개의 측벽 배기팬 (총 풍량 30,000 CMH)의 주기 운전을 통하여 목표 환기량을 달성한다. 11일령 조건일때와 마찬가지로 환기팬 작동 시간 산출에 앞서, 작동에 따른 계군 내 열환경 변화를 모의하고 운영 지침에 따른 환기 시스템의 적정 “on time” 산출을 위하여 환기 팬이 작동된 후 1분간의 상황에 대한 시뮬레이션 연산을 수행하였다.

외기온이 각각 영하 5, 15, 25 $^{\circ}\text{C}$ 일 때 환기 시스템 작동에 따른 영역별 온도 변화 추이는 각각 다음과 같다. 영하 5 $^{\circ}\text{C}$ 조건일 경우 운영 지침에 따른 주기 산출을 위하여 90초간 연산을 수행하였다.

Table 3.3.60. 외기 조건 -5℃, 환기 시스템을 연속 운전할 경우 영역별 온도 분포
(Unit: ℃)

time sec.	location of plane									ave.	max	min	diff.
	1-1	1-2	1-3	2-1	...	4-3	5-1	5-2	5-3				
1	22.4	22.5	22.4	22.5	...	22.5	22.4	22.5	22.4	22.5	22.6	22.4	0.2
2	22.4	22.6	22.4	22.5	...	22.5	22.4	22.6	22.4	22.5	22.7	22.4	0.3
3	22.5	22.7	22.4	22.5	...	22.5	22.5	22.7	22.4	22.6	22.8	22.4	0.4
4	22.5	22.8	22.5	22.6	...	22.6	22.5	22.8	22.5	22.6	22.9	22.5	0.5
5	22.5	22.9	22.5	22.7	...	22.6	22.5	22.9	22.5	22.7	23.0	22.5	0.5
6	22.6	23.0	22.5	22.7	...	22.7	22.5	23.0	22.5	22.8	23.2	22.5	0.6
7	22.6	23.1	22.5	22.8	...	22.7	22.5	23.1	22.5	22.8	23.3	22.5	0.8
8	22.6	23.2	22.5	22.8	...	22.7	22.4	23.2	22.5	22.9	23.5	22.4	1.1
9	22.5	23.4	22.5	22.7	...	22.7	22.2	23.3	22.5	22.9	23.6	22.2	1.4
10	22.3	23.5	22.3	22.6	...	22.5	22.0	23.5	22.3	22.8	23.9	22.0	1.9
11	22.0	23.7	22.0	22.3	...	22.2	21.7	23.6	22.0	22.7	24.1	21.7	2.4
12	21.7	23.8	21.6	22.1	...	21.7	21.4	23.6	21.6	22.5	24.3	21.4	2.9
13	21.4	23.7	21.1	21.8	...	21.2	21.0	23.6	21.1	22.2	24.3	21.0	3.3
14	21.1	23.6	20.5	21.5	...	20.6	20.7	23.4	20.5	21.9	24.2	20.5	3.7
15	20.8	23.3	20.0	21.2	...	20.0	20.4	23.0	20.0	21.5	23.9	20.0	3.9
16	20.6	22.8	19.6	20.9	...	19.6	20.2	22.6	19.6	21.1	23.4	19.6	3.9
17	20.4	22.2	19.2	20.7	...	19.2	20.0	22.0	19.2	20.7	22.8	19.2	3.6
18	20.2	21.6	18.9	20.5	...	18.9	19.8	21.4	18.9	20.3	22.1	18.9	3.3
19	20.1	21.0	18.6	20.3	...	18.6	19.7	20.8	18.6	20.0	21.4	18.6	2.8
20	20.0	20.5	18.4	20.2	...	18.4	19.5	20.3	18.4	19.7	20.9	18.4	2.5
21	20.0	20.2	18.3	20.1	...	18.2	19.5	20.0	18.3	19.5	20.4	18.2	2.2
22	19.9	19.9	18.1	20.1	...	18.1	19.4	19.7	18.1	19.3	20.1	18.1	2.0
.
.
.
72	18.8	17.0	16.7	18.6		17.3	17.6	16.6	16.7	17.6	18.8	16.6	2.2
73	18.8	17.0	16.6	18.6		17.2	17.6	16.6	16.6	17.5	18.8	16.6	2.2
74	18.8	16.9	16.6	18.5		17.2	17.5	16.6	16.6	17.5	18.8	16.6	2.2
75	18.8	16.9	16.5	18.5		17.1	17.5	16.6	16.5	17.4	18.8	16.5	2.2
.

Table 3.3.61. 외기 조건 -15℃, 환기 시스템을 연속 운전할 경우 영역별 온도 분포
(Unit: ℃)

time sec.	location of plane									ave	max	min	diff.
	1-1	1-2	1-3	2-1	...	4-3	5-1	5-2	5-3				
1	22.4	22.5	22.4	22.4	...	22.4	22.4	22.5	22.4	22.5	22.6	22.4	0.2
2	22.3	22.6	22.3	22.4	...	22.4	22.3	22.6	22.3	22.5	22.7	22.3	0.4
3	22.3	22.7	22.3	22.4	...	22.4	22.3	22.7	22.3	22.5	22.8	22.3	0.5
4	22.3	22.8	22.3	22.5	...	22.4	22.3	22.8	22.3	22.5	22.9	22.3	0.6
5	22.3	22.8	22.3	22.5	...	22.4	22.2	22.8	22.3	22.6	23.0	22.2	0.8
6	22.2	22.9	22.2	22.5	...	22.4	22.1	22.9	22.2	22.6	23.2	22.1	1.1
7	22.1	23.0	22.1	22.4	...	22.3	21.8	23.0	22.1	22.6	23.3	21.8	1.5
8	21.8	23.1	21.9	22.1	...	22.1	21.5	23.1	21.9	22.4	23.5	21.5	2.1
9	21.4	23.2	21.4	21.8	...	21.6	21.0	23.2	21.4	22.2	23.7	21.0	2.7
10	21.0	23.3	20.8	21.4	...	20.9	20.5	23.2	20.8	21.9	23.9	20.5	3.4
11	20.5	23.3	20.0	20.9	...	20.0	20.1	23.1	20.0	21.4	23.9	20.0	4.0
12	20.1	23.1	19.1	20.5	...	19.2	19.6	22.8	19.1	20.9	23.7	19.1	4.6
13	19.8	22.6	18.4	20.1	...	18.4	19.2	22.3	18.4	20.4	23.3	18.4	4.9
14	19.4	22.0	17.8	19.8	...	17.8	18.9	21.7	17.8	19.9	22.7	17.8	4.9
15	19.2	21.2	17.3	19.5	...	17.3	18.6	20.9	17.3	19.4	21.9	17.3	4.6
16	19.0	20.5	16.9	19.2	...	17.0	18.3	20.2	16.9	18.9	21.1	16.9	4.1
17	18.8	19.7	16.6	19.1	...	16.7	18.1	19.5	16.6	18.5	20.2	16.6	3.6
18	18.8	19.1	16.4	18.9	...	16.4	18.0	18.9	16.4	18.2	19.6	16.4	3.2
19	18.7	18.7	16.2	18.8	...	16.2	17.9	18.4	16.2	17.9	19.1	16.2	2.9
20	18.6	18.3	16.0	18.7	...	16.0	17.7	18.1	16.0	17.7	18.7	16.0	2.7
21	18.5	18.0	15.8	18.6	...	15.9	17.6	17.9	15.9	17.5	18.6	15.8	2.8
22	18.5	17.8	15.7	18.6	...	15.8	17.5	17.7	15.7	17.4	18.6	15.7	2.9
23	18.4	17.6	15.5	18.5	...	15.7	17.3	17.5	15.6	17.2	18.5	15.5	2.9
.
.
.
57	16.1	14.5	13.7	15.9	...	14.5	15.2	14.3	13.6	14.9	16.1	13.6	2.5
58	16.1	14.5	13.7	15.8	...	14.4	15.1	14.2	13.6	14.9	16.1	13.6	2.5
59	16.0	14.4	13.6	15.8	...	14.3	15.0	14.1	13.5	14.8	16.0	13.5	2.5
60	15.9	14.3	13.5	15.7	...	14.2	14.8	14.0	13.4	14.7	15.9	13.4	2.5

Table 3.3.62. 외기 조건 -25℃, 환기 시스템을 연속 운전할 경우 영역별 온도 분포
(Unit: ℃)

time sec.	location of plane									ave	max	min	diff.
	1-1	1-2	1-3	2-1	...	4-3	5-1	5-2	5-3				
1	22.3	22.5	22.3	22.4	...	22.4	22.3	22.5	22.3	22.4	22.6	22.3	0.3
2	22.2	22.6	22.2	22.3	...	22.3	22.2	22.6	22.2	22.4	22.7	22.2	0.5
3	22.2	22.6	22.1	22.3	...	22.3	22.2	22.6	22.1	22.4	22.8	22.1	0.7
4	22.1	22.7	22.1	22.3	...	22.3	22.1	22.7	22.1	22.4	22.9	22.1	0.8
5	22.0	22.8	22.0	22.3	...	22.2	21.9	22.8	22.0	22.4	23.0	21.9	1.2
6	21.8	22.8	21.8	22.1	...	22.1	21.5	22.8	21.8	22.3	23.2	21.5	1.7
7	21.3	22.9	21.4	21.7	...	21.6	20.9	22.9	21.4	22.1	23.4	20.9	2.5
8	20.8	23.0	20.7	21.2	...	20.8	20.2	22.9	20.7	21.7	23.5	20.2	3.3
9	20.1	23.0	19.6	20.6	...	19.8	19.6	22.8	19.6	21.1	23.6	19.6	4.1
10	19.6	22.8	18.5	20.0	...	18.6	18.9	22.6	18.5	20.5	23.5	18.5	5.0
11	19.0	22.3	17.4	19.4	...	17.4	18.4	22.0	17.4	19.8	23.1	17.4	5.7
12	18.6	21.6	16.5	19.0	...	16.5	17.8	21.3	16.5	19.1	22.4	16.5	5.9
13	18.2	20.7	15.8	18.5	...	15.8	17.4	20.4	15.8	18.4	21.5	15.8	5.7
14	17.9	19.8	15.3	18.2	...	15.3	17.1	19.4	15.3	17.8	20.5	15.3	5.2
15	17.7	18.8	14.8	17.9	...	14.9	16.8	18.5	14.8	17.2	19.5	14.8	4.6
16	17.6	18.0	14.5	17.7	...	14.5	16.6	17.7	14.5	16.8	18.6	14.5	4.1
17	17.4	17.4	14.2	17.6	...	14.2	16.4	17.1	14.2	16.4	17.9	14.2	3.8
18	17.3	16.9	13.9	17.4	...	14.0	16.2	16.6	13.9	16.1	17.4	13.9	3.6
19	17.2	16.5	13.6	17.3	...	13.8	16.0	16.3	13.6	15.8	17.3	13.6	3.7
20	17.1	16.1	13.4	17.2	...	13.6	15.8	15.9	13.4	15.6	17.2	13.4	3.8
.
.
.
54	13.0	11.5	10.4	12.8	...	11.2	12.0	11.2	10.1	11.8	13.0	10.1	2.9
55	12.9	11.4	10.3	12.7	...	11.0	11.8	11.1	10.0	11.7	12.9	10.0	2.9
56	12.8	11.3	10.1	12.6	...	10.9	11.7	11.0	9.9	11.6	12.8	9.9	2.9
57	12.7	11.2	10.0	12.5	...	10.8	11.6	10.8	9.7	11.5	12.7	9.7	2.9
58	12.5	11.1	9.9	12.4	...	10.7	11.4	10.7	9.6	11.4	12.5	9.6	3.0
59	12.4	11.0	9.8	12.3	...	10.5	11.3	10.6	9.4	11.3	12.5	9.4	3.0
60	12.3	10.9	9.6	12.2	...	10.4	11.2	10.5	9.3	11.1	12.4	9.3	3.1

예를 들어 외기온이 영하 5℃인 경우, 운영 조건을 계사 운영자의 계군 기대 온도 즉, 25일령의 경우 22.5℃를 기준으로 ± 2 ℃를 계군 생육 온도로 설정할 경우 영역별 평균 온도를 토대로 환기가 시작된 후 18초 후, 적정 온도 최저치에 도달하는 것으로 나타났으며, ± 3 ℃가 기준일 경우 21초, ± 5 ℃가 기준일 경우에는 73초인 것으로 나타났다. ± 5 ℃의 경우 환기가 진행됨에 따라 차가운 외기가 유입됨에도 불구하고 계군에서 발생하는 닭의 발열량에 의하여 어느 정도 열적 평형이 이루어지기 때문에 적정 온도에 도달하는 데 소요되는 시간이 길게 나타난 것으로 판단된다. 이때 각 영역별 최고 온도 및 최저 온도와의 편차는 각각 3.3℃, 2.2℃, 2.2℃인 것으로 나타났다. 외기온이 영하 15℃인 경우, ± 2 ℃를 운영 지침으로 설정할 때 환기가 시작된 후 13초 후 적정 온도 최저치에 도달하는 것으로 나타났으며 ± 3 ℃는 15초 ± 5 ℃는 21초의 결과를 얻을 수 있었다. 이때 각 영역별 최고 온도 및 최저 온도와의 편차는 각각 4.9℃, 4.6℃, 2.8℃로 환기가 진행되는 시간이 길수록 온도 편차의 절대적 크기는 작아지는 것으로 나타났으나 절대적인 열환경 또한 낮은 온도 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 외기온이 영하 25℃인 경우, 각각의 운영 지침에 대하여 10초, 11초, 14초의 환기 작동 시간을 산출할 수 있었다.

각각의 시간을 운영기준에 부합되는 계군 생육 온도 설정을 위한 환기 시스템의 작동 시간 “on time”이라고 정의할 때, 환기 시스템이 정지되었다가 다시 작동되기 이전까지의 시간 즉 “off time”을 산출하기 위하여 목표 환기량 대비 전체 팬 환기량 값을 이용하여 산출한 외기 온도 대비 각 운영 조건에 따른 환기 시스템 가동 / 중지 시간은 다음 Table 3.1.20와 같다. 건물의 기밀성이 확보되었다고 가정할 경우, 본 연구 대상 육계사와 동일한 강제 환기 시스템 형태를 지닌 구조에 대하여 상기 주어진 외기 조건에 따라 계사 운영주의 운영 지침 별 환기 시스템의 가동 및 중지 시간을 다음 표와 같이 제시할 수 있다

Table 3.3.63. 25일령 조건 시 외기 온도 대비 운영 기준에 따른 환기 시스템 on/off
(Unit: sec.)

Outdoor temp.	ventilation	±2℃		±3℃		±5℃	
-5℃	fan (on)	18	40	21	47	73	162
	fan (off)	22		26		89	
-15℃	fan (on)	13	29	15	34	21	47
	fan (off)	16		19		26	
-25℃	fan (on)	10	23	11	25	14	31
	fan (off)	13		14		17	

25일령 설계 환기량 기준, 외기 조건 및 운영 지침 조건 별 환기 시스템의 작동/중지에 따른 계군 내 평균 온도 변화 추이는 각각 다음 그림과 같다.

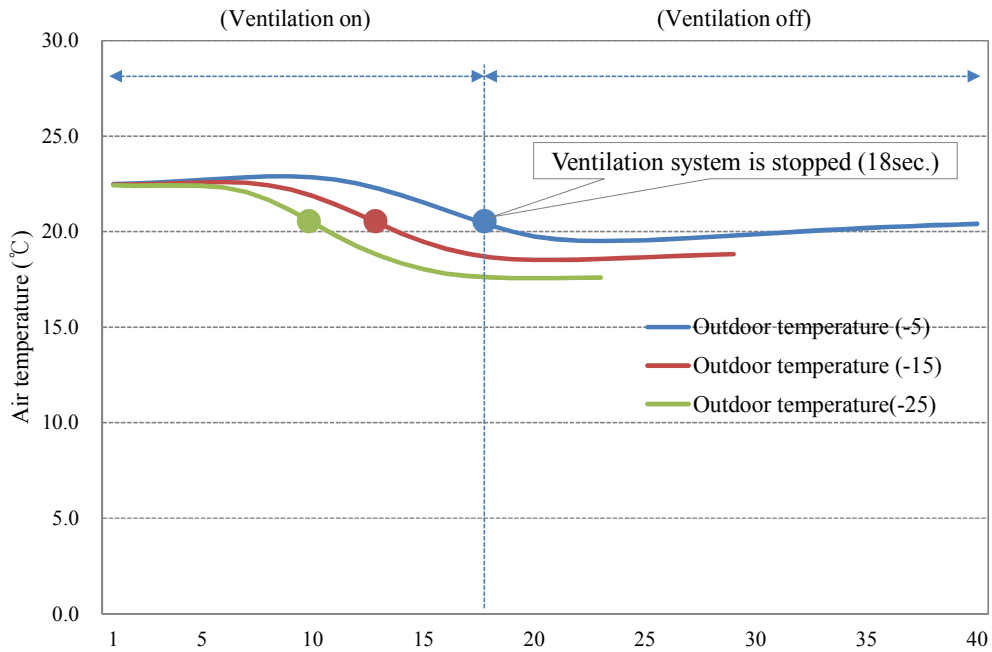


Fig. 3.3.22. 25일령 조건 시 운영 기준이 설계 기준 온도±2℃일 때 환기 시스템 가동 및 중지에 따른 계군 내 평균 온도 변화 추이

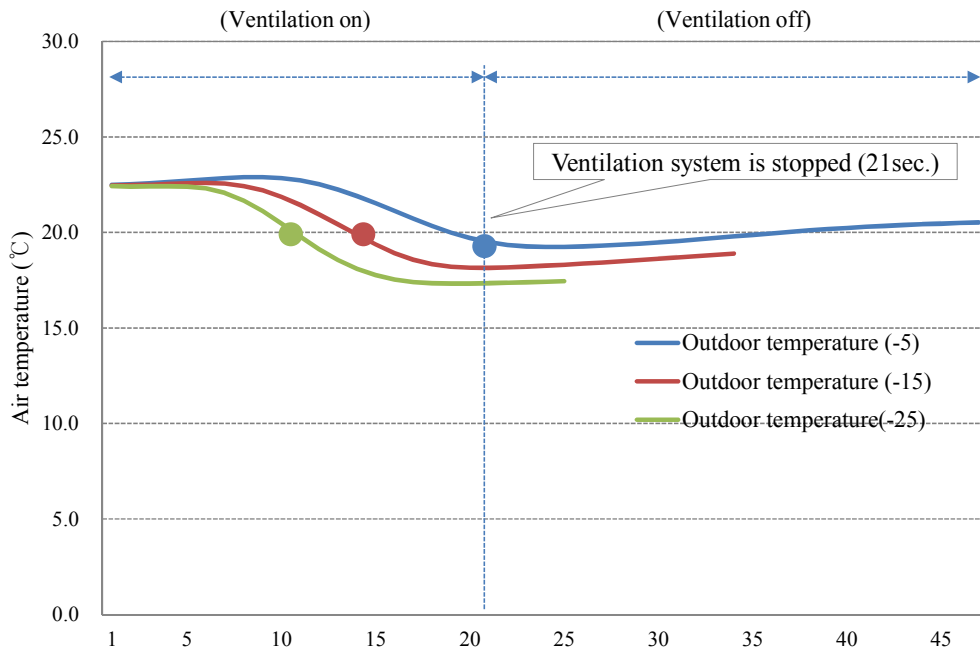


Fig. 3.3.23. 25일령 조건 시 운영 기준이 설계 기준 온도 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 일 때 환기 시스템 가동 및 중지에 따른 계군 내 평균 온도 변화 추이

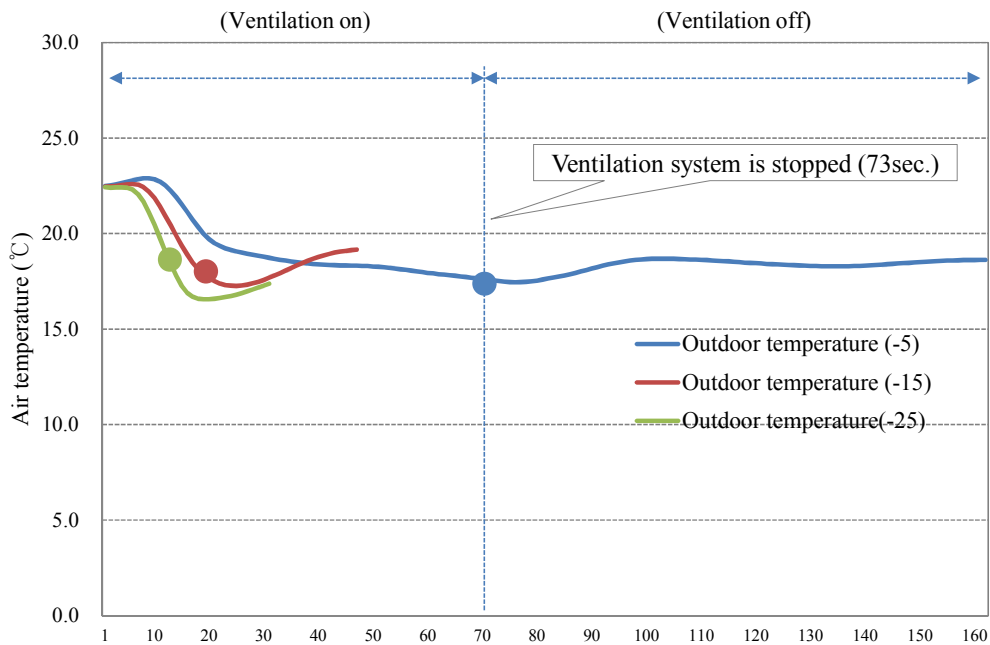


Fig. 3.3.24. 25일령 조건 시 운영 기준이 설계 기준 온도 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 일 때 환기 시스템 가동 및 중지에 따른 계군 내 평균 온도 변화 추이

외기 온도가 -5℃일 때 각 운영 기준에 따른 지역별 온도 분포는 다음과 같다.

Table 3.3.64. 25일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (°C)						
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
18 (on time)	20.2	20.5	20.5	20.5	19.8	22.1	18.9
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	21.6	22.1	22.1	22.1	21.4	20.3	3.3
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	18.9	18.9	18.9	18.9	18.9	1.3	
40 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	20.2	20.2	20.2	20.2	19.9	21.9	19.2
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	21.3	21.9	21.9	21.9	21.3	20.4	2.7
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	19.2	19.6	19.5	19.6	19.2	1.0	

25일령 조건 시, 외기 조건이 -5℃, 설계 운영 조건이 ±2℃일 때, 시뮬레이션 연산을 통하여 산출된 환기팬 작동 시간은 18초이며, 환기팬 작동 중지 시간은 22초로 총 40초의 환기 싸이클을 산출하였다. 상기 조건일 때 환기 시스템이 작동 된 후 종료 되는 순간의 평균 온도는 20.3℃로 설계 운영 조건에 부합되었으며 지역별 최고 및 최소 온도 차는 약 3.3℃, 표준 편차는 1.3℃로 나타났다. 이후 환기 시스템의 작동이 중지된 후 22초가 지난 후 내부 평균 온도는 20.4℃로 약 0.1℃가량 상승한 것으로 나타났다. 이는 시설 내부에 이미 유입된 차가운 외기로 인한 영향 및 계관에서 발생하는 열원 간의 열적 평형에 기인한 결과로 사료된다. 온도 편차는 2.7℃로 약 0.6℃ 감소하였고 표준편차는 1.0℃로 나타났다. 배기팬이 위치하는 n-1 행에 비하여 입기 슬롯의 개수가 더 많은 n-3 행에서는 환기팬이 작동이 종료되는 시점에서 각각 20.3℃, 18.9℃로 1.4℃가량의 온도 편차를 보였으며 환기 시스템 작동 주기가 종료되는 시점 즉 40초 이후에는 각각 20.14℃, 19.42℃로 0.72℃의 온도 편차를 보였다. 따라서 앞선 11일령 시와 마찬가지로 입기 슬롯의 개수가 많은 n-3 구역에 대하여 집중적인 열환경 관리가 필요할 것으로 판단된다.

Table 3.3.65. 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
21 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	20.0	20.1	20.1	20.1	19.5	20.4	18.2
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	20.2	20.4	20.4	20.4	20.0	19.5	2.2
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
18.3	18.2	18.2	18.2	18.3	0.9		
47 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	20.3	20.4	20.5	20.5	20.0	21.8	19.5
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	21.1	21.7	21.7	21.8	21.3	20.5	2.3
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
19.5	19.8	19.8	19.8	19.5	0.8		

Table 3.3.66. 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
73 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	18.8	18.6	18.6	18.5	17.6	18.8	16.6
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	17.0	17.4	17.3	17.4	16.6	17.5	2.2
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
16.6	17.2	17.3	17.2	16.6	0.8		
162 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	17.7	18.6	19.7	18.9	17.2	20.6	16.6
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	19.0	20.6	20.2	20.4	18.8	18.6	4.0
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
16.6	18.2	17.6	18.3	17.5	1.2		

운영 지침 ±3℃의 경우 평균 온도는 환기 팬의 작동이 중지된 후 약 1℃가량 상승하였고 운영 지침 ±5℃의 경우 역시 마찬가지로 약 1.1℃ 가량 회복되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 11일령 조건과 비교하여 25일령 조건일 때 계군에서의 발

열량이 상대적으로 높기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 해당 조건일 때 또한 n-1 행에 비하여 입기 슬롯의 개수가 많은 n-3 행에서 낮은 온도 분포를 보여 이 구획에 대하여 열풍기 등을 이용한 집중적인 열관리가 필요할 것으로 사료된다.

외기 조건 -5°C 일 때 운영 지침에 따른 환기 시스템의 작동/중지에 따른 계군 높이 즉, 바닥으로부터 40cm 높이에서의 열환경 분포는 다음 그림과 같다. 환기 시스템이 작동되는 동안에는 입기 슬롯으로부터 외기가 유입되는 구역의 경우 상대적으로 낮은 온도 분포로 인한 온도 불균일성을 형성하여 닭의 쏠림 현상 및 호흡기성 질병에 대한 노출이 증가 될 수 있을 것이라 사료된다. 환기 시스템의 작동이 중지되는 동안 정성적인 열환경 결과로부터 지역 간 편차가 줄어들었음을 확인할 수 있으며 이는 내부 공기층간의 열교환이 상대적으로 활발하게 이루어졌음을 의미한다고 볼 수 있다.

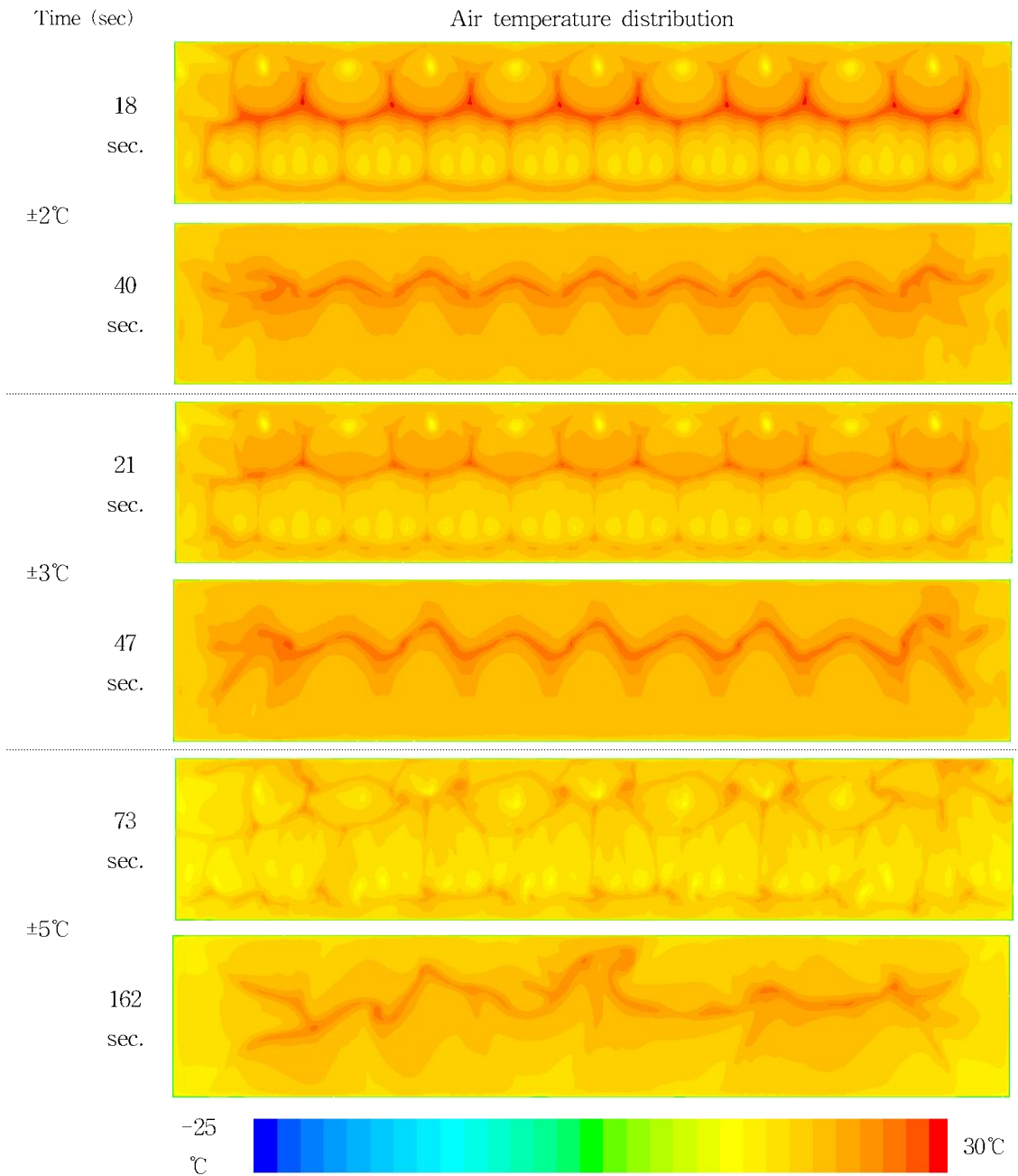


Fig. 3.3.25. 외기 온도 -5°C일 때 운영 지침 별 환기 시스템 작동/중지에 따른 계군 높이(40cm) 열환경 분포

외기 조건이 -15°C일 때 각 운영 지침에 따른 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포는 다음과 같다.

Table 3.3.67. 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
13 (on time)	19.8	20.1	20.1	20.1	19.2	23.3	18.4
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	22.6	23.3	23.3	23.3	22.3	23.3	4.9
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4	2.0	
29 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	18.7	18.9	18.9	18.9	18.4	20.2	17.5
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	19.5	20.2	20.2	20.2	19.4	18.8	2.6
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
17.5	18.1	18.0	18.1	17.5	0.9		

25일령 조건, 외기온이 -15℃, 운영 지침이 ±2℃인 경우 환기 시스템의 작동 / 중지 에 대하여 42초의 환기 시스템 운전 사이클이 종료되는 시점에 약 4.5℃의 온도 하락을 보이는 반면 온도 균일성은 약간 상승하는 것으로 나타났다. 환기 팬이 작동하는 13초 이후 지역별 최고 및 최저 온도 간의 편차는 무려 4.9℃가량으로 나타났으나 환기팬의 작동이 중지된 후 이는 약 2.6℃정도로 2.3℃가량 줄어드는 것으로 나타났으며 지역 간 온도값의 표준편차 역시 1.1℃가량 감소하는 것으로 나타났다. 이는 환기 시스템의 작동이 중지됨에 따라 외기의 유입이 없고 계군에서 발생하는 열원에 의한 열교환이 활발하게 이루어지기 때문으로 판단할 수 있다. 앞선 외기 온도 -5℃결과와 마찬가지로, n-1 보다 n-3 구역에서 낮은 온도 분포를 보이고 있으며 특히 환기 시스템이 작동하는 동안 1.46℃간의 온도 편차를 보이고 있는 것으로 나타나 입기 슬롯이 상당 수 배치되어 있는 측벽 인근에서 열환경 관리에 주의를 기울여야 될 것으로 판단된다. 환기 시스템의 동작이 멈춘 후에는 이러한 폭방향에 따른 온도 편차는 줄어드는 것으로 나타났다.

Table 3.3.68. 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
15 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	19.2	19.5	19.5	19.5	18.6	21.9	17.3
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	21.2	21.9	21.9	21.9	20.9	19.4	4.6
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	1.8	
34 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	18.7	18.9	18.9	18.9	18.3	20.1	17.8
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	19.4	20.1	20.1	20.1	19.4	18.9	2.3
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	17.8	18.3	18.3	18.3	17.8	0.8	

Table 3.3.69. 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
21 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	18.5	18.6	18.6	18.6	17.6	18.6	15.8
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	18.0	18.4	18.4	18.4	17.9	17.5	2.8
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	15.8	15.9	15.9	15.9	15.9	1.2	
47 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	18.6	18.9	19.0	18.9	18.4	20.6	18.2
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	19.4	20.6	20.6	20.6	19.5	19.2	2.4
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	18.3	18.8	18.8	18.8	18.2	0.8	

운영 지침이 $\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 인 경우 앞선 경우와 마찬가지로 환기 시스템이 작동되는 동안 폭 방향에 따른 온도 불균일성이 발견되었다. 이는 크로스 환기 방식을 채용하는 해당 계사의 환기 방식에서 불가피한 결과로써 입기 슬롯으로부터 유입된 외기가 계군 내로 떨어져 낮은 저온대를 형성하는 구역에 대한 집중적인 열환경 관리 및 사양 관리가 필요할 것으로 판단된다.

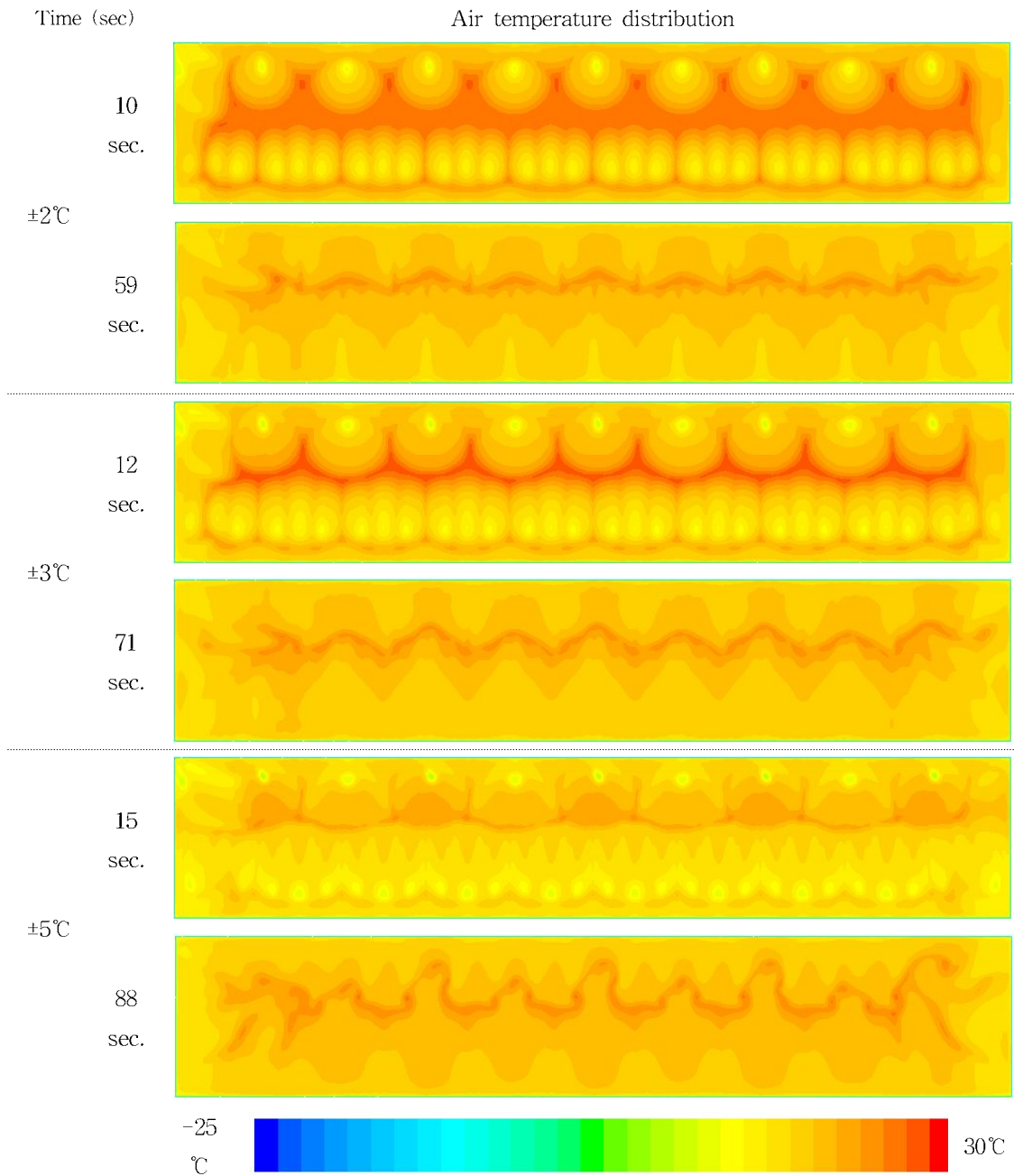


Fig. 3.3.26. 외기 온도 -15°C 일 때 운영 지침 별 환기 시스템 작동/중지에 따른 계군 높이(40cm) 열환경 분포

외기 조건이 -25°C 일 때 각 운영 지침에 따른 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포는 다음과 같다. 앞선 외기 조건 및 운영 지침 조건 결과와 마찬가지로 환기 시스템이 작동되는 동안 폭 방향 온도 구배가 발생하며 환기 시스템의 작동이 중지 될 때 열교환에 의한 열적 균일성 향상이 다소 발생하는 것으로 나타났다. 외기 조건이 -5°C , -15°C 에 비하여 해당 경우 지역간 온도 편차가 크게 발생하는 것으로 나타나 동절기 외기 기온이 하락할수록 일반 강제 환기 계사에서 지역간 온도차로 인한 온도 불균일성의 문제가 대두됨을 예측할 수 있다. 이는 실제 동절기 환기 운영 시, 입기 슬롯으로부터 유입되는 차가운 공기로 인하여 닭이 그 구역을 회피함에 따라 일정 지역에 닭이 몰리는 쏠림현상, 호흡기성 질병의 발생 등의 원인으로 작용된다.

Table 3.3.70. 외기 온도 -25°C , 운영기준이 기준온도 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location ($^{\circ}\text{C}$)						
	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
10 (on time)	19.6	20.0	20.0	20.0	18.9	23.5	18.5
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	22.8	23.5	23.5	23.5	22.6	20.5	5.0
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	18.5	18.6	18.6	18.6	18.5	2.1	
23 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	17.6	17.9	17.9	17.9	17.1	18.9	16.0
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	18.2	18.9	18.9	18.9	18.0	17.6	2.9
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	16.0	16.7	16.7	16.7	16.1	1.0	

Table 3.3.71. 외기 온도 -25℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
11 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	19.0	19.4	19.4	19.4	18.4	23.1	17.4
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	22.3	23.1	23.1	23.1	22.0	23.1	5.7
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	17.4	17.5	17.5	17.4	17.4	2.3	
25 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	17.5	17.8	17.8	17.8	17.0	18.6	16.0
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	17.9	18.6	18.6	18.6	17.7	17.4	2.6
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	16.0	16.7	16.7	16.7	16.1	0.9	

Table 3.3.72. 외기 온도 -25℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 온도 분포

Time (sec)	Air temperature at each monitoring location (℃)						
14 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	17.9	18.2	18.2	18.2	17.1	20.5	15.3
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	19.8	20.5	20.5	20.5	19.4	17.8	5.2
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	2.1	
31 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	17.4	17.7	17.7	17.7	16.8	18.2	16.4
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	17.3	18.2	18.1	18.2	17.4	17.4	1.8
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
	16.4	17.1	17.1	17.1	16.4	0.6	

외기 조건이 -25°C 일 때 운영 지침에 따른 지역 별 열환경 정성적 결과는 다음과 같다.

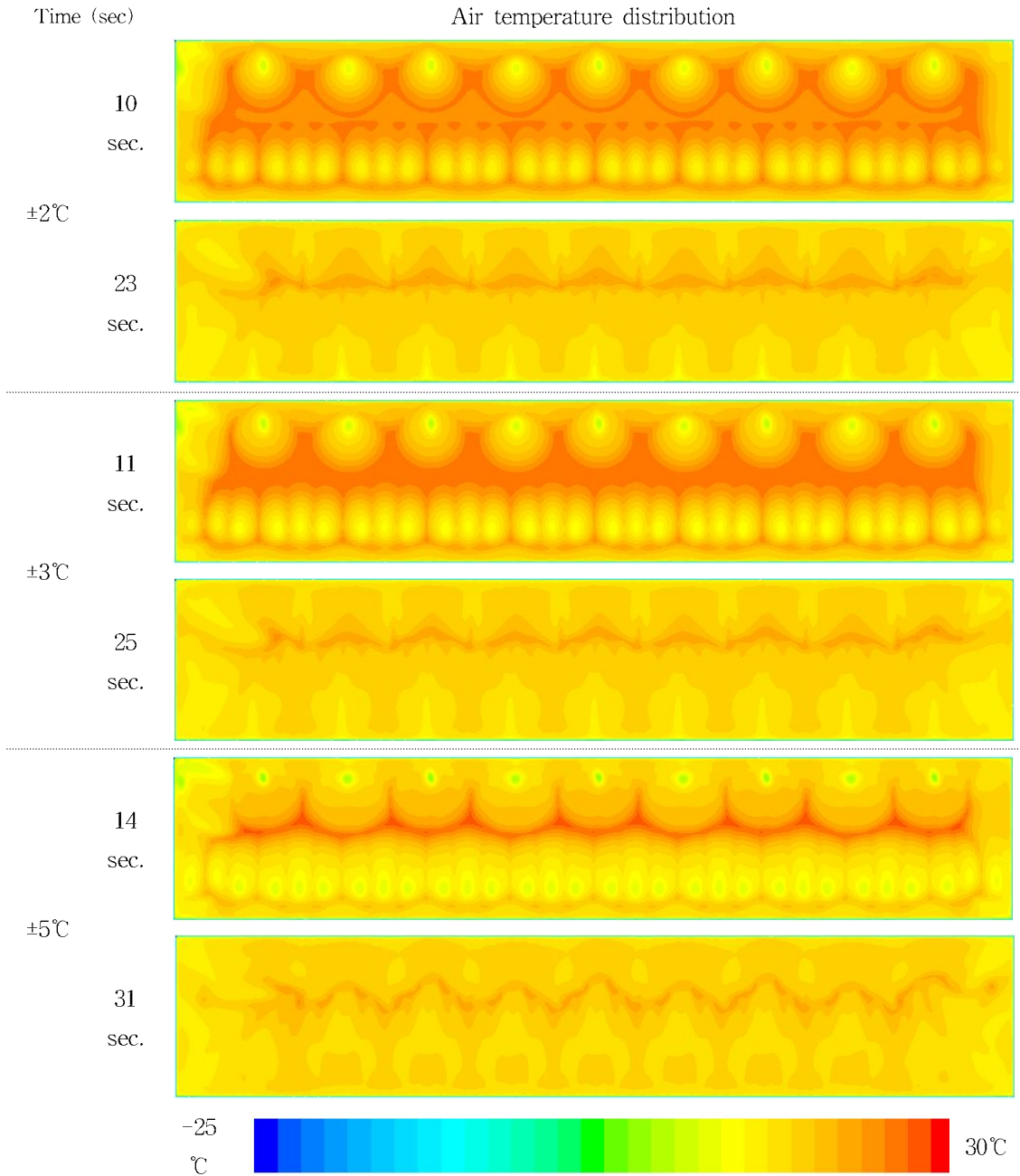


Fig. 3.3.27. 외기 온도 -25°C 일 때 운영 지침 별 환기 시스템 작동/중지에 따른 계군 높이(40cm) 열환경 분포

25일령 설계 환기량에 대한 각 조건에 대하여 생육 걱정 온도를 기준으로 온도

적정성을 평가하기 위하여 전산유체역학 메인 모듈인 FLUENT를 이용하여 바닥으로부터 40cm 떨어져 있는 평면 즉 가상의 계군에 대한 열환경 분포를 파악하고자 하였다. 이를 위하여 해당 평면에서의 수치 해석을 위한 각각의 cell로부터의 온도 값을 추출하여 각 운영 기준 운영 지침에 어느 정도 만족하는지를 평가하였다. 이때 벽체에서의 전도 열손실로 적정성이 과소 평가되는 것을 방지하기 위하여 사방의 측벽으로부터 20cm 떨어진 평면 cell에서의 온도 값을 추출하고자 하였다. 이에 대한 결과는 다음 표와 같다. 퍼센트로 표현되는 값은 전체 각 cell에서 추출한 온도 값 대비 해당 기준에 부합되는 온도 값을 갖는 cell의 면적비로써 온도 적정성을 평가하기 위한 임의 지표이다.

Table 3.3.73. 계군 cell에서 추출한 온도값을 토대로 한 적정성 평가 (운영 지침: $\pm 2^{\circ}\text{C}$)

Outdoor air temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Ventilation on	Ventilation off
-5	33.5%	37.8%
-15	27.6%	12.6%
-25	42.1%	6.2%

운영 지침을 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 적용할 경우 -5°C 외기 조건일 경우 환기 시스템이 작동하는 18초 이후 25일령 기준 적정 기대 온도인 22.5°C 를 기준으로 적정 온도 허용 범위에 만족하는 비율은 33.5%로 나타났으며 환기 시스템의 작동이 중지된 후 환기 운영 주기가 종료되는 시점이 40초에는 37.8%로 4.3% 가량 적정성 지수가 상승하는 것으로 나타났다. 이는 계군에서 발생하는 25일령 기준 닭 발열량이 열원으로 작용하여 온도 상승에 기여하기 때문으로 판단된다. -15°C 및 -25°C 외기 조건의 경우 앞선 -5°C 결과와는 달리 환기 시스템의 각 운영 주기가 종료되는 시점에 적정성 지수 역시 하락하는 것으로 나타났는데 이는 환기 시스템이 작동하는 동안 계사 내로 유입되는 외기 온도 값의 절대적인 수치가 낮기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다. 즉 환기 시스템이 작동되는 동안 유입되는 차가운 외기류가 환기 시스템의 작동이 중지된 이후에 계군 인근에서 혼합되면서 계군에서의 발열량 보다 높은 열손실을 유발하기 때문으로 판단된다. 따라서 환기 팬이 작동하지 않는 “off time” 동안에도 계군 내 온도 적정성 유지 및 온도 불균일성 해소를 위한 추가적인 열원의 공급이 필수적이다.

운영 지침을 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 적용할 경우 -5°C 외기 조건일 경우 환기 시스템 작동 시간 후에는 약 49.6%의 비율로 적정 온도 범위에 만족하며 환기 시스템의 작동이 중지

된 후 즉 “off time”이 적용될 동안 계군 내 공기 온도 값이 하락하면서 약 3.7%의 비율로 기준 온도에 만족하는 것으로 나타났다. -15℃ 및 -25℃의 외기 조건의 경우에도 마찬가지로 환기 시스템의 작동이 중지된 후, 계사 내부 온도 하락현상으로 인하여 해당 운영 지침에 부합되는 적정 온도를 갖는 영역이 줄어드는 것으로 나타났다. 따라서 열풍기 등의 추가적인 열원의 공급이 필수적일 것이라 판단된다.

Table 3.3.74. 계군 cell에서 추출한 온도값을 토대로 한 적정성 평가 (운영 지침: ±3℃)

Outdoor air temp. (℃)	Ventilation on	Ventilation off
-5	46.5%	81.9%
-15	36.8%	25.6%
-25	50.1%	8.7%

Table 3.3.75. 계군 cell에서 추출한 온도값을 토대로 한 적정성 평가 (운영 지침: ±5℃)

Outdoor air temp. (℃)	Ventilation on	Ventilation off
-5	47.5%	76.6%
-15	43.3%	88.5%
-25	48.9%	42.9%

운영 지침 ±3℃의 경우 -5℃ 외기 조건일 때 환기 팬의 작동이 종료되는 시점에 비하여 환기 주기가 종료되는 시점에 35.4% 가량 적정성 범위에 만족하는 구간이 증가하는 것으로 나타났으나 이보다 낮은 외기 조건에서는 환기 운영 주기가 종료되는 시점에 적정성 지수가 급격하게 떨어지는 것으로 나타났다. 운영 지침 ±5℃의 경우 -5℃, -15℃ 외기 조건일 때 환기 주기가 종료되는 시점에서 적정성 지수가 상승하는 것으로 나타나 계군 자체의 발열량을 이용한 열적 회복에는 유리할 것으로 판단되나 절대적인 온도 수치(해당 운영 지침에서 요구하는 온도 범위가 -17.5℃~27.5℃)가 낮은 값을 갖기 때문에 계군에서 호흡기성 질병을 유발할 수 있는 가능성을 간과할 수 없을 것으로 판단된다.

따라서 이러한 각 환경 조건 별 환기 시스템 운영 주기(“on time” / “off time”)를 토대로 계사 경영에 있어 계군 내 적정 열환경 조성 및 지역별 온도 분포를 토대로 안정적인 열환경 조성을 위한 추가 열원 공급 및 관리에 참고자료로써 활용할 수

있을 것이라 판단된다.

다. 일반 환기 시스템 on/off 운전에 따른 가스 제거율 평가

계사 내 적절한 환기 운영은 가축을 사육하는 계군 내 적정 열환경 조성 외에도 계군에서 발생할 수 있는 각종 분진 및 에어로졸 등과 같은 입자상 물질 및 암모니아, 악취 등과 같은 가스상 물질의 제거를 위해서도 중요하다. Georgia University에서 제공하는 “Poultry Housing tips”에 따르면 동절기 육계 생산성 향상을 위한 이상적인 환경 조건으로 이산화탄소의 경우 5,000 ppm 이하, 상대 습도의 경우 60% 내외, 암모니아 농도는 30 ppm 미만을 제시하고 있다. 이러한 적정 환경 조건이 충족되지 않을 경우 닭 개체의 비정상적인 활동량 증가 혹은 감소, 음수량, 사료 섭취량 등의 증가 혹은 감소를 유발시켜 생산성에 직결되는 문제로 작용할 뿐만 아니라 내부 환경이 지역적으로 불균일해질 경우 닭의 쏠림 현상으로 인하여 압사 혹은 질식되는 개체가 발생할 수 있다. 또한 질병의 발생 및 감염률 증가 또한 야기될 수 있다. 따라서 적정 열환경 조성 외에 각종 오염물질 및 유해가스 제거 또한 안정적인 육계 생산성 제고를 위해 필수적이라고 할 수 있다.

Georgia University에서 제공하는 “Poultry Housing tips”에 따르면 계사 내 수분 문제에 있어서 동절기 충분치 못한 환기는 시설 내 과습 현상을 야기하고 이와 관련된 다양한 2차, 3차 문제를 발생시킬 수 있으며 과다 환기는 난방비의 초과 지출 뿐만 아니라 낮은 상대 습도 환경을 조성하여 분진 발생을 증가시킬 수 있다고 지적하였다. 그러나 동절기 최소 환기량을 결정하는데 있어서 외기의 온도 조건이 외기의 상대 습도 조건에 비하여 더 결정적으로 작용한다고 보고 하였다. 이는 Jennifer T. (2010)이 “Winter Ventilation Basics”에 기고한 화씨 10°F의 공기 온도 증가는 20%의 상대 습도 감소를 야기시킬 수 있다는 데에서 그 원인을 찾을 수 있다. 즉 동절기 차갑고 건조한 외기가 계사 내부로 유입될 때 계사 내부에 따뜻한 공기층과의 열교환으로 인하여 상대적으로 건조한 공기의 수분문제를 어느 정도 해결할 수 있다고 지적하고 있는데 이는 습공기 선도를 통해서도 유추할 수 있다.

“Poultry Housing tips”을 통하여 계사 내 이산화탄소 농도를 5,000 ppm으로 유지하기 위한 최소 환기량을 사육하는 닭 일령에 따라 다음과 같이 제시하고 있다. 그래프 내 녹색 곡선은 계사 내 닭이 유일한 열원일 때, 빨간 곡선은 닭 외에 추가적인 열원이 공급될 때 기기 자체에서 발생하는 이산화탄소 발생량을 고려한 추천 최소 환기량이다.

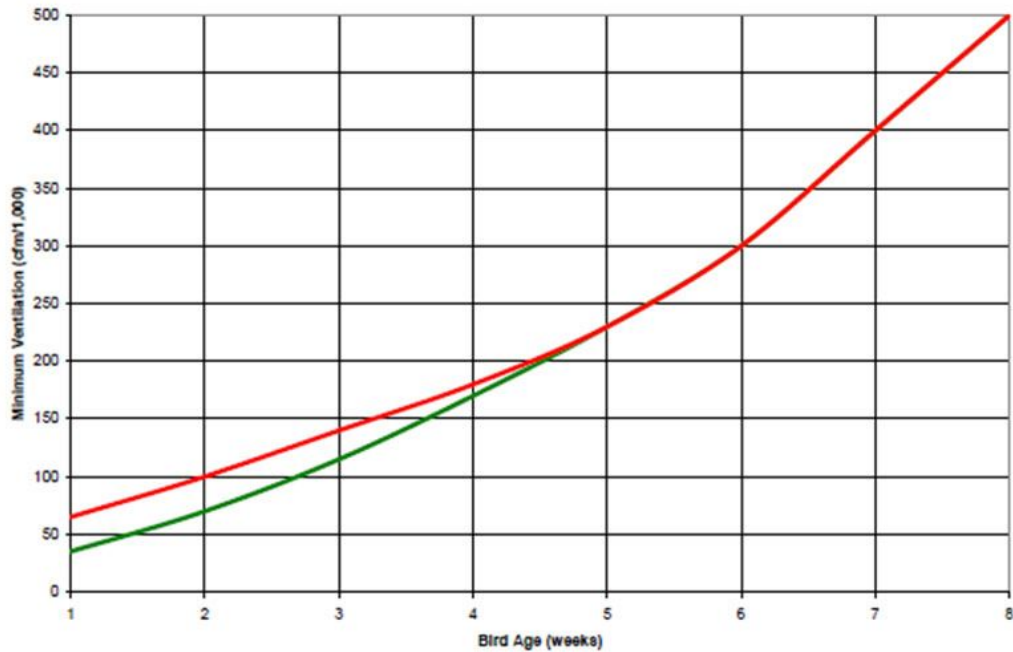


Fig. 3.3.28. 이산화탄소 농도를 5,000 ppm 이하로 유지하기 위한 추천 최소 환기량 (cfm/1,000 birds)

이에 본 연구에서 적용한 (주) 하림에서 제공하는 11일령 및 25일령 시 추천 환기량 조건에 따른 이산화탄소 농도의 적정성 여부를 판단하기 위하여 상기 그래프를 이용하여 비교 및 분석을 실시하였다. 해당 그래프로부터 각각 11일령 및 25일령에 해당하는 추천 환기량을 읽고 단위를 환산하여 현재 적용한 11일령 환기량 5,100 CMH 및 25일령 환기량 13,600 CMH와 비교하였다. 그 결과는 다음과 같다.

Table 3.3.76. 이산화탄소 농도 유지를 위한 추천 최소환기량 곡선 및 조건 별 환산 환기량

	환기량	환산 환기량	
11일령 (약 1.6주)	80 CFM/1,000 birds	2,718.4 CMH	birds+heating
	60 CFM/1,000 birds	2,038.8 CMH	birds
25일령 (약 3.6주)	170 CFM/1,000 birds	5,776.6 CMH	birds+heating
	150 CFM/1,000 birds	5,097.0 CMH	birds

상기 자료에서 제공하는 그래프를 토대로 11일령 기준 이산화탄소 농도 적정 수준 유지를 위한 환기량은 내부 열원으로 닭 및 난방 장치가 있을 때 약 2,720 CMH, 난방 장치가 없다고 가정할 때 약 2,040 CMH로 현재 국내 적용하고 있는 설계 환

기량 5,100 CMH 수준에 미치지 못하는 값을 보이고 있다. 이는 현재의 환기량 수준으로 적정 이산화탄소 농도 유지에 적합하다고 판단할 수 있다. 25일령 기준일 때 또한 각각 약 5,780 CMH, 약 5,100 CMH 수준으로 13,600 CMH의 현재 국내 적용 설계 환기량에 미치지 못하는 값을 보여 적정 이산화탄소 농도 조성을 위한 환기량으로써 이론상 충분할 것이라고 판단할 수 있다.

이산화탄소 외에 암모니아 등과 같은 각종 유해가스, 분진, 미생물등의 각종 입자상·생물학적 물질의 계군 내 제거율 등을 추정하기 위하여 전산유체역학 시뮬레이션 모델에서 일종의 추적가스 개념을 도입하여 농도의 감소율을 산출하였다. 각 조건에 따른 구조 별로 시뮬레이션 연산이 수행되기 전, 즉 환기 시스템이 작동되기 전에 가상의 추적가스가 계사 전체에 가득 차 있다고 가정한 후 환기 시스템이 작동됨에 따라 내부의 가스가 제거되는 비율을 산정하고자 하였다.

외기 조건(-5℃, -15℃, -25℃)에 따른 각 운영 지침 별 (기준 온도±2℃, ±3℃, ±5℃) 조건에 따른 환기 시스템 작동 on/off 시 지역별 가스 제거율은 다음과 같다.

Table 3.3.77. 11일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
13 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.19	3.74	3.74	3.74	4.65	5.80	1.62
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	1.62	1.92	1.92	1.91	1.88	3.73	4.18
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
5.11	5.80	5.80	5.80	5.12	1.60		
77 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	2.23	2.98	3.03	3.02	2.38	3.17	2.17
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	2.17	2.56	2.57	2.58	2.51	2.76	1.00
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
2.96	3.17	3.13	3.17	3.01	0.35		

외기 조건 -5℃, 운영 지침 ±2℃ 조건일 경우 환기 시스템이 작동되는 동안 계군 내 추적가스 평균 제거율은 약 3.73%이며 환기 시스템이 작동이 중지된 후 환기 주기가 종료되는 시점 즉, 77초 시각에서의 계군 내 추적가스 평균 제거율은 2.76%이다. 이는 환기가 진행되는 동안에는 외기가 계군내로 그대로 유입되면서 상대적으로

로 높은 추적가스 제거율을 보이다가 환기가 종료되면서 계사 내부에 존재하는 기존 추적가스와 혼합에 의하여 제거율이 다소 하락하는 것으로 판단된다. 앞선 열환경 분포에서와 마찬가지로 계사 폭 방향에 따라 입기 슬롯이 다수 존재하는 n-3행에서 높은 가스 제거율을 보이나 환기 시스템의 작동이 중지되는 동안 계군 내 지역별 가스 제거율은 서로 유사한 값을 보이는 것으로 나타났다. 상기 결과를 종합해보면 외기 조건 -5°C , 운영 지침 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 조건일 경우 계군 내 가스 제거율은 최종적으로 환기 운영 주기가 종료되는 시점에서의 2.76%라고 볼 수 있다.

Table 3.3.78. 11일령 조건 시 외기 온도 -5°C , 운영기준이 기준온도 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
15 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.65	4.39	4.39	4.39	5.33	7.77	3.65
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	3.71	4.35	4.35	4.34	4.05	5.34	4.12
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
6.92	7.77	7.77	7.77	6.94	1.60		
88 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.01	3.31	3.32	3.29	3.19	3.61	2.94
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	2.94	3.32	3.35	3.32	3.07	3.30	0.67
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
3.33	3.61	3.57	3.57	3.37	0.20		

외기 온도 -5°C , 운영 기준 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 일 때 환기 시스템 운영 한 주기에 따른 계군 내 추적가스 최종 제거율은 3.30%로 나타났다. 지역별 최대 및 최저 가스 제거율 차이는 0.67%, 구역 간 표준 편차는 약 0.20%로 나타났다.

Table 3.3.79. 11일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
23 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	4.08	5.04	5.04	5.04	6.04	10.71	4.08
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	10.02	10.70	10.71	10.70	10.08	8.43	6.64
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
8.95	10.35	10.35	10.35	8.97	2.56		
135 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	4.71	4.69	4.52	4.63	5.54	5.54	3.71
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	4.42	4.41	4.42	4.42	4.69	4.46	1.83
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
3.71	4.31	4.31	4.21	3.86	0.42		

외기 온도 -5℃, 운영 기준 ±5℃일 때 환기 시스템 운영 한 주기에 따른 계군 내 추적가스 최종 제거율은 4.46%로 나타났다. 지역별 최대 및 최저 가스 제거율 차이는 1.83%, 구역 간 표준 편차는 약 0.42%로 나타났다.

동일한 방법으로 산출한 외기 온도 -15℃, -25℃ 및 세 가지 운영 기준에 따른 지역별 추적가스 제거율은 다음과 같다.

Table 3.3.80. 11일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
10 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	2.62	3.01	3.01	3.01	3.83	4.26	0.67
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	0.67	0.78	0.77	0.77	0.81	2.64	3.58
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
3.75	4.26	4.26	4.26	3.75	1.46		
59 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	1.53	2.07	2.08	2.08	1.57	2.14	1.42
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	1.42	1.43	1.42	1.42	1.58	1.81	0.72
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
2.05	2.14	2.12	2.14	2.10	0.32		

Table 3.3.81. 11일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
12 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.40	4.04	4.04	4.04	4.91	6.98	2.22
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	2.22	2.60	2.60	2.60	2.47	4.42	4.76
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
6.25	6.98	6.98	6.98	6.26	1.83		
71 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	2.32	3.29	3.37	3.29	2.32	3.37	2.08
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	2.08	2.56	2.60	2.58	2.37	2.63	1.29
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
2.41	2.62	2.60	2.61	2.40	0.39		

Table 3.3.82. 11일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
15 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.90	4.81	4.81	4.81	5.70	9.12	3.90
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	5.87	6.69	6.70	6.69	6.18	6.66	5.22
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
8.22	9.12	9.12	9.12	8.23	1.75		
88 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.69	3.26	3.32	3.28	4.18	4.18	3.03
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	3.06	3.49	3.54	3.52	3.50	3.44	1.15
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
3.03	3.58	3.58	3.57	3.03	0.30		

Table 3.3.83. 11일령 조건 시 외기 온도 -25℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
8 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	2.07	2.33	2.33	2.33	3.07	3.07	0.37
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	0.37	0.41	0.41	0.40	0.45	1.90	2.70
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
2.64	3.00	3.00	3.00	2.64	1.13		
47 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	1.17	1.40	1.40	1.40	1.19	1.61	0.96
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	1.08	0.97	0.97	0.96	1.18	1.29	0.64
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
1.52	1.52	1.51	1.52	1.61	0.23		

Table 3.3.84. 11일령 조건 시 외기 온도 - 25℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
9 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	2.68	3.09	3.09	3.09	3.87	4.66	0.75
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	0.75	0.86	0.86	0.86	0.88	2.82	3.91
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
4.15	4.66	4.66	4.66	4.15	1.57		
53 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	1.46	1.91	1.93	1.92	1.46	1.93	1.25
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	1.31	1.26	1.25	1.25	1.48	1.64	0.68
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
1.83	1.91	1.90	1.90	1.89	0.29		

Table 3.3.85. 11일령 조건 시 외기 온도 - 25℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
12 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.71	4.51	4.51	4.51	5.39	8.40	3.72
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	3.81	4.37	4.37	4.37	4.09	5.61	4.68
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
7.63	8.40	8.40	8.40	7.64	1.87		
71 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.03	3.20	3.28	3.25	3.36	3.36	2.30
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	2.45	2.85	2.91	2.87	2.67	2.84	1.06
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
2.34	2.69	2.71	2.68	2.30	0.34		

3가지 외기 조건 별 환기 운영 지침에 따른 가스 제거율을 종합하면 다음과 같다. 운영 지침의 허용 폭이 클수록 환기 팬의 작동 시간이 늘어나고 그에 따라 가스 제거율 또한 상승하는 경향을 보여준다. 또한 외기 온도가 낮을수록 낮은 가스

제거율을 보이는데 이는 환기 팬 가동 시간의 감소에 기인한 결과이다. 이에 계군에서의 암모니아 혹은 기타 유해가스의 시간당 발생율을 적용하면 환기 팬 작동 유무에 따른 내부 유해 가스 농도를 추정할 수 있으리라 판단된다.

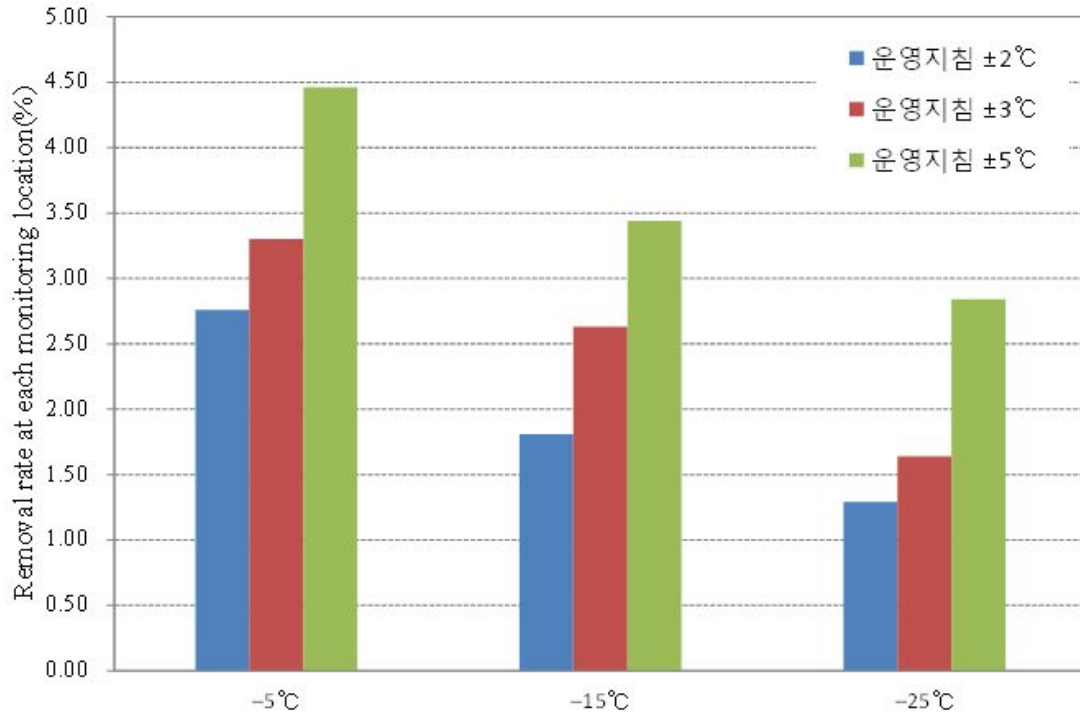


Fig. 3.3.29. 11일령 기준 외기 온도 및 계사 환기 운영 지침 조건에 따른 가스 제거율 (%)

25일령 조건일 때 외기 온도 및 계사 환기 운영 지침 조건에 따른 지역별 가스 제거율은 다음과 같다. 11일령 환경 조건 시 결과와 마찬가지로 환기 시스템이 작동되는 동안 지역별 가스 제거율의 편차가 두드러지게 나타나나 환기 팬이 작동이 중지되는 “off time” 동안 내부 가스 혼합에 의하여 평균 가스 제거율 수치는 다소 하락하나 지역간 편차는 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 외기 온도가 -5°C일 때 운영 지침 ±2~5°C에 따라 제거율은 각각 1.99%, 2.16%, 11.65%로 나타났다. 11.65%의 가스 제거율의 경우 환기 팬의 작동 시간이 73초로 타구조에 비하여 긴 환기 운전 적용에 따른 결과로 사료된다. 외기 조건 -15°C인 경우 세가지 운영 지침 조건에 대하여 약 2% 중반대의 제거율을 보였으며 외기 조건 -25°C인 경우, 2.22~3.10%의 가스 제거율 값을 보이는 것으로 나타났다.

Table 3.3.86. 25일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
18 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.74	4.60	4.60	4.59	5.47	8.78	3.74
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	5.71	6.63	6.63	6.62	6.03	6.44	5.04
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
7.85	8.78	8.78	8.78	7.87	1.68		
40 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	1.06	0.91	0.92	0.92	1.14	3.60	0.91
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	3.30	3.57	3.60	3.58	3.40	1.99	2.69
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
1.47	1.47	1.47	1.46	1.52	1.12		

Table 3.3.87. 25일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
21 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.73	4.67	4.67	4.66	5.55	9.69	3.73
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	8.00	9.03	9.03	9.03	8.24	7.52	5.96
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
8.58	9.69	9.69	9.69	8.60	2.18		
47 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	2.00	1.72	1.75	1.73	1.82	2.96	1.72
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	2.78	2.84	2.89	2.82	2.96	2.16	1.24
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
1.79	1.79	1.79	1.78	1.89	0.52		

Table 3.3.88. 25일령 조건 시 외기 온도 -5℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
73 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	13.36	15.20	15.68	15.21	13.43	17.03	12.17
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	15.89	16.57	16.96	16.59	17.03	14.57	4.86
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
12.82	12.44	12.17	12.44	12.77	1.84		
162 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	10.02	13.34	12.93	13.60	12.35	13.60	10.02
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	10.70	11.53	11.05	11.83	11.94	11.65	3.58
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
10.90	10.90	10.41	11.76	11.55	1.05		

Table 3.3.89. 25일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
13 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.42	4.09	4.09	4.09	4.96	7.23	2.38
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	2.38	2.79	2.79	2.79	2.62	4.58	4.85
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
6.49	7.23	7.23	7.23	6.50	1.87		
29 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	0.89	0.92	0.92	0.92	1.08	5.32	0.89
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	4.66	5.32	5.32	5.32	4.74	2.63	4.44
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
1.80	1.89	1.89	1.89	1.81	1.84		

Table 3.3.90. 25일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
15 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.71	4.57	4.57	4.56	5.43	8.66	3.72
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	4.68	5.41	5.41	5.40	4.98	6.02	4.94
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
7.82	8.66	8.66	8.66	7.83	1.76		
34 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	0.97	0.84	0.85	0.84	0.97	3.92	0.84
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	3.59	3.90	3.92	3.90	3.72	2.00	3.08
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
1.29	1.29	1.30	1.29	1.33	1.34		

Table 3.3.91. 25일령 조건 시 외기 온도 -15℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
21 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.80	4.70	4.69	4.69	5.63	9.93	3.80
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	9.10	9.87	9.89	9.87	9.21	7.90	6.14
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
8.66	9.93	9.93	9.93	8.66	2.41		
47 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.44	3.56	3.64	3.53	2.64	3.64	1.80
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	3.07	2.70	2.73	2.68	3.61	2.72	1.84
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
1.80	1.82	1.80	1.82	1.94	0.74		

Table 3.3.92. 25일령 조건 시 외기 온도 - 25℃, 운영기준이 기준온도 ±2℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
10 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	2.91	3.40	3.40	3.40	4.19	5.49	0.99
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	0.99	1.14	1.14	1.14	1.13	3.28	4.51
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
4.91	5.49	5.49	5.49	4.91	1.78		
23 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	1.07	1.24	1.25	1.24	1.44	6.02	1.07
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	5.16	6.01	6.02	6.01	5.25	3.10	4.95
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
2.24	2.43	2.43	2.43	2.26	1.97		

Table 3.3.93. 25일령 조건 시 외기 온도 - 25℃, 운영기준이 기준온도 ±3℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
11 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.28	3.90	3.90	3.90	4.72	6.84	1.80
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	1.80	2.10	2.10	2.10	2.00	4.18	5.06
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
6.19	6.86	6.86	6.85	6.20	1.97		
25 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	0.96	1.05	1.05	1.05	1.22	5.72	0.96
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	4.95	5.71	5.72	5.71	5.04	2.82	4.75
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
1.89	2.03	2.03	2.02	1.91	1.96		

Table 3.3.94. 25일령 조건 시 외기 온도 -25℃, 운영기준이 기준온도 ±5℃일 때 환기 시스템 작동 및 중지 시 지역별 추적가스 제거율

Time (sec)	Removal rate of tracer gas at each monitoring location (%)						
14 (on time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	3.80	4.70	4.70	4.70	5.54	9.15	3.80
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	5.34	6.08	6.08	6.08	5.62	6.45	5.36
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
8.31	9.15	9.15	9.15	8.32	1.86		
31 (off time)	plane 1-1	plane 2-1	plane 3-1	plane 4-1	plane 5-1	Max.	Min.
	1.21	1.05	1.07	1.05	1.09	4.41	1.05
	plane 1-2	plane 2-2	plane 3-2	plane 4-2	plane 5-2	Ave.	Diff.
	4.03	4.40	4.41	4.40	4.23	2.22	3.36
	plane 1-3	plane 2-3	plane 3-3	plane 4-3	plane 5-3	STDEV.	
1.25	1.26	1.26	1.25	1.30	1.52		

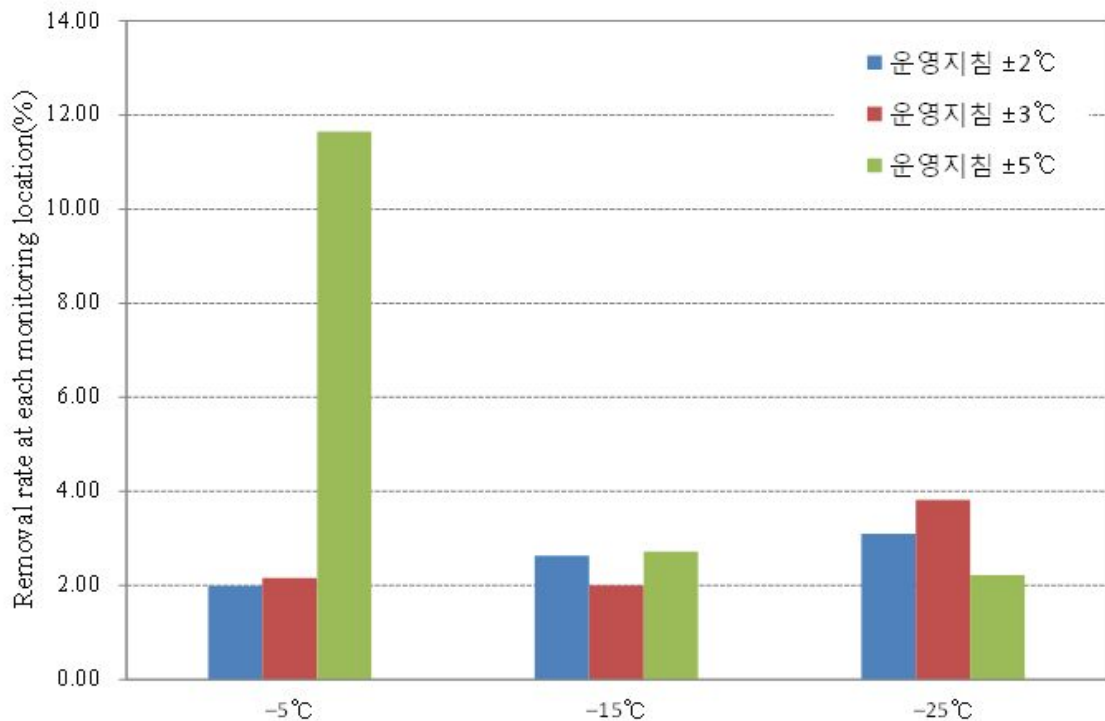


Fig. 3.3.30. 25일령 기준 외기 온도 및 계사 환기 운영 지침 조건에 따른 가스 제거율 (%)

제 4 절 Jet drop distance 이론을 이용한 입기 슬롯으로부터 유입되는 기류의 궤적 특성 분석

1. Jet drop distance model, 입기류 도달거리 이론

현재 국내 대다수의 육계시설은 무창계사 형태로 환기 방식은 하절기의 경우 터널 환기 방식을, 환절기 및 동절기의 경우 측벽에 설치된 배기 팬 및 다수의 입기 슬롯을 이용한 크로스 환기 방식을 채택하고 있다. 그러나 환절기 및 동절기에 환기를 실시할 경우 상대적으로 밀도가 높은 차가운 외기가 그대로 계군으로 유입될 경우 이때 형성되는 온도 불균일성 및 안정성 하락으로 인하여 계군의 열적 스트레스를 유발할 수 있다. 이는 각종 호흡기성 질병의 원인으로 작용할 뿐만 아니라 이로 인한 닭의 쏠림 현상, 사료 섭취량 및 음수량의 감소, 면역력 저하, 폐사율 증대에 따른 다양한 경제적인 손실을 야기 시킬 수 있다(Deaton et al., 1996; Donald et al., 2001, 2003; Fairchild and Czarick, 2006). 따라서 차가운 외기가 그대로 계군 내로 도달하지 않고 최대한 시설 내부 상단에 존재하는 따뜻한 공기층과 열교환이 이루어지도록 입기류를 유도하는 것이 중요하다.

환기가 이루어지는 대상 공간으로 유입되는 기류의 궤적을 파악하기 위하여 아르키메데스 수(Archimedes Number, Ar) 및 수정 아르키메데스 수(Corrected Archimedes Number, Ar_c) 등을 이용한 다양한 연구가 진행되었다. 그러나 그동안 기류의 궤적 특성을 파악하고자 시도하였던 연구자들(Randall and Battams, 1979, Leonard and McQuitty, 1986, Berckmans et al., 1993)의 현장실험에 따라 서로 다른 환경 및 구조 등 실험 조건의 차이로 인하여 불명확하고 상이한 기준치를 제시하는 등 많은 한계가 존재하였다.

이에 Zhang 등(1996, 1999)은 실험실 규모의 소규모 축산 시설 모형을 대상으로 공간으로 유입되는 외기류의 궤적 조절에 대한 기준 마련을 위하여 아르키메데스 수 등을 이용한 입기류 도달거리(Jet-drop distance) 모델을 제시한 바 있다.

Zhang 등에 따르면 입기구로부터 유입되는 차가운 공기는 공기 자체가 보유하고 있는 열 에너지, 시설 내부 온도, 입기류의 유입 각도, 입기구 인근에 형성되는 압력 차, 입기구의 수리학적 형상 등 다양한 요인의 영향을 받는다고 보고하였다. 이들은 실험실 규모에서 입기 슬롯의 유입 각도(25, 90도), 입기구 높이, 입기구 개방 정도, 내·외부 온도 차 등을 실험 변수로 온도 센서를 바닥에 종횡으로 설치하여 입기 슬롯으로부터의 도달거리를 측정하였으며 아르키메데스 수, Jet-drop factor, 수정 아르키메데스 수 등 다양한 변인과 도달거리 간의 상관관계를 도출하고자 하였

다.

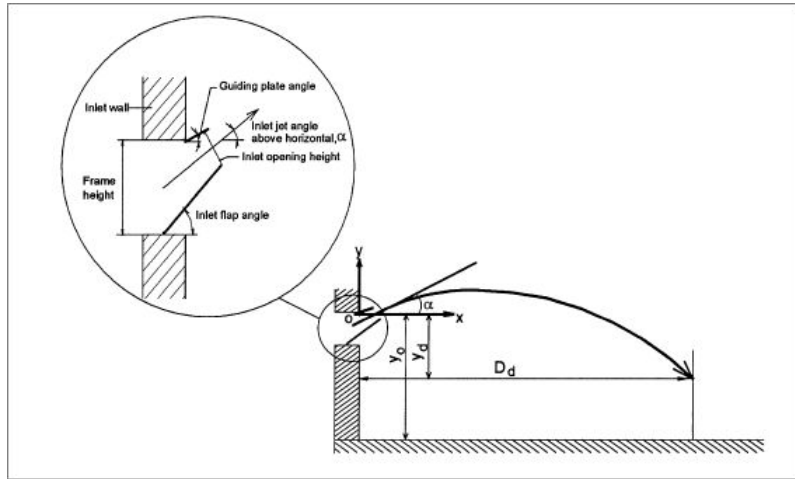


Fig. 3.4.1. Jet drop distance 실험 개요 및 개념
(Zhang et al., 1996, 1999)

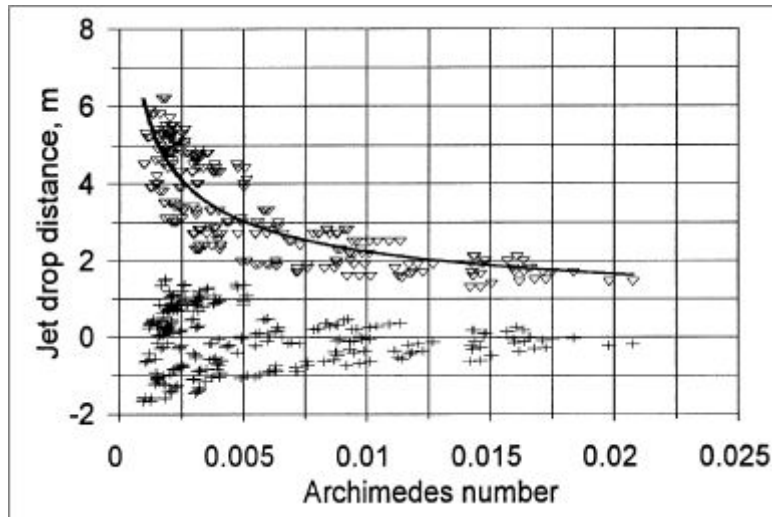


Fig. 3.4.2. 아르키메데스 수 및 입기류 도달거리 간의
상관곡선 (Zhang et al., 1996, 1999)

이때 실험 변수로 사용된 아르키메데스 수는 공기가 갖는 부력과 모멘텀의 비율로써 무차원의 형태로 다음과 같이 정의된다(Abramovich, 1963).

$$Ar = \frac{g \cdot d \cdot (T_i - T_o)}{v_o^2 \cdot T_i} \quad \text{식 (3.4.1.)}$$

여기서 Ar 은 아르키메데스 수, d 는 유입구의 직경(m), g 는 중력 가속도(ms^{-2}), T_i 는 실내 내부 온도(K), T_o 는 유입되는 외기의 온도(K), v_o 는 유입구에서의 초기 속도(ms^{-1})를 의미한다. 사각 형태를 갖는 입기구 구조에서 직경 d 는 수력학적 지름으로 대치가 가능하다.

$$d_{eq} = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_e}{\pi}} \quad \text{식 (3.4.2.)}$$

$$A_e = Q \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot \Delta p}} \quad \text{식 (3.4.3.)}$$

여기서 A_e 는 입기구의 유효 면적(m^2), d_{eq} 는 수력학적 지름(hydraulic diameter, m), Δp 는 입기구 전후 압력차(Pa), Q 는 입기구 유량(m^3s^{-1}), ρ 는 공기 밀도(kgm^{-3})를 의미한다.

Randall 과 Battams(1979)가 제시한 수정 아르키메데스 수는 환기가 이루어지는 대상 공간의 기하학적 형태 및 특성을 반영하기 위하여 수정된 식으로써 다음과 같이 정의된다.

$$Ar_c = \frac{g \cdot (T_s - T_o) \cdot C_d \cdot bh \cdot (B+H) \cdot BH}{(T_s + T_o) \cdot Q^2} \quad \text{식 (3.4.4.)}$$

여기서 Ar_c 는 수정 아르키메데스 수, b 는 입기구의 폭(m), B 는 입기구가 설치된 측벽의 폭(m), C_d 는 입기구에서의 배출 계수, h 는 입기구 높이 (m), H 는 입기가 설치된 측벽의 높이(m), T_s 는 바닥 혹은 동물군 열원에서 온도 (K)를 의미한다.

입기류 도달거리(Jet-drop distance, D_d)는 입기구로부터 유입된 기류가 동물 군 높이까지 도달 시, 그 궤적의 측벽으로부터의 수평거리를 의미한다. 일반적으로 입기류 도달거리가 길수록 동물군에 도달하게 될 때까지 소요되는 시간이 늘어나고 이로 인하여 시설 내부 상단에 존재하는 상대적으로 높은 열에너지를 보유하고 있는 공기층과의 열교환 확률이 증가된다. 따라서 보다 높은 온도를 갖는 공기가 동물 군에 제공됨에 따라 열적 균일성 향상 효과 및 호흡기성 질병에 대한 노출을 줄

일 수 있다. 다음 Fig. 2.3.2.12는 입기류 도달거리(D_d) 및 입기류 도달높이와 입기 구 간의 높이 차(y_d), 입기구 높이(y_o)를 도시하고 있다.

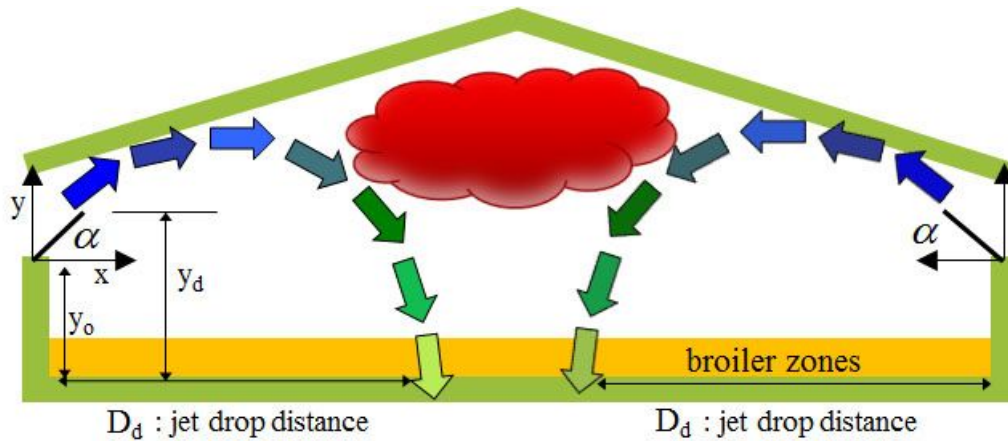


Fig. 3.4.3. Jet drop distance 개념

Zhang 등 (1996, 1999)은 입기구에서 배출되는 기류의 궤적과 입기류 도달거리간의 관계를 규명하기 위하여 Koestel (1955)과 Abramovich 등(1963)의 연구결과를 바탕으로 아르키메데스 수, 수력학적 지름, 입기류 도달 거리가 발생하는 수직 높이 및 입기구 간의 높이 차, 입기구의 유입 각도 등을 주요 변수로 제시하였다. 해당 변수로부터 Jet-drop factor(F_{jd})를 제시하였고 이와 입기류 도달거리간의 상관관계를 토대로 Jet-drop distance model을 식 (3.4.6)과 같이 제시한 바 있다. 그 외에 아르키메데스 수 및 식 (3.4.7)과 같은 수정 아르키메데스 수와 입기류 도달거리 간의 상관관계를 분석하였으며 이에 대한 결정 계수 값 및 평균평방근 (root-mean-square, RMS) 값을 이용하여 모델 간의 상대 비교를 실시한 바 있다.

$$F_{jd} = \frac{Ar}{y_o \cdot d_{eq}^2} \quad \text{식 (3.4.5)}$$

$$\text{Model A: } D_d = c_1 + c_2 F_{jd}^{-\frac{1}{3}} \quad (\text{Zhang et al., 1996}) \quad \text{식 (3.4.6)}$$

$$\text{Model B: } D_d = c_3 + c_4 Ar_c^{-\frac{1}{3}} \quad (\text{Zhang et al., 1999}) \quad \text{식 (3.4.7)}$$

여기서 c_1 는 모델 A의 매개변수(m) c_2 는 모델 A의 매개변수, c_3 는 모델 B의 매개변수(m), c_4 는 모델 B의 매개변수를 의미한다.

그러나 이들은 논문의 상당한 부분을 할애하여 도달거리 산정 시, 입기 슬롯을 통하여 유입되는 기류를 가시적으로 확인하기 어려워 이를 정성적 및 정량적으로 평가하기 어려우며 온도 센서 등을 이용한 현장 실험 시, 실험 데이터를 통한 입기류 도달거리 측정 및 판단에 연구자의 주관성이 관여되었던 점, 내부 공기 유동의 변동 정도에 따른 데이터의 안정성 문제 등 다양한 한계성을 지적한 바 있다. 또한 이들의 실험의 경우 입기 슬롯의 개수가 1개(Zhang et al., 1996) 3개(Zhang et al., 1999)인 실험 챔버에 국한되는 등 실제 육계사 환기 운영 연구에 적용하기에는 부족하다. 따라서 본 연구 파트에서는 입기류 도달거리 산출을 위한 현장실험과 더불어 전산유체역학 시뮬레이션 기법을 이용하여 실제 연구 대상 육계사 구조를 대상으로 다중 입기 슬롯으로부터의 입기류 도달거리를 측정하고 Jet drop distance 이론의 적용 가능성을 검토하고 이에 대한 특성을 파악하고자 하였다.

2. 입기류 도달거리 측정을 위한 현장 실험

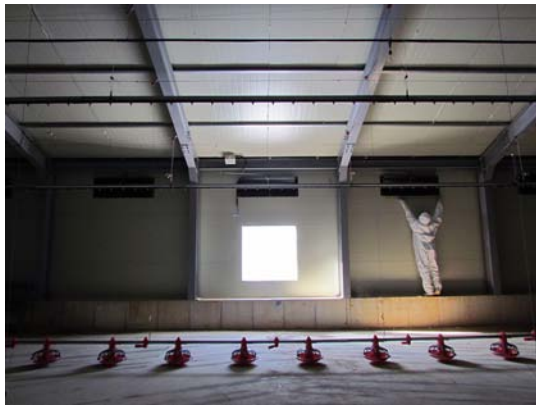
국내 일반적인 육계사 시설을 대상으로 환기 시스템이 작동될 때 입기구로부터 유입되는 외기의 기류 궤적 측정을 위한 현장 실험을 진행하였다. 2012년 1월~2월에 걸쳐 전라북도 부안군에 소재하는 신축 공사 중인 육계사 시설 내에서 실험을 진행하였다. 해당 계사는 총길이 95m, 최고점높이 5m, 측고 높이 3.2m, 폭은 16m이며 한쪽 측벽에는 직경 38인치의 배기팬이 균일한 간격으로 5기가 배치되어 있다. 입기 슬롯의 크기는 폭 1.2m, 높이 0.35m로 중심 간 간격은 3m로 바닥으로부터 2.6m 높이에 배치되어 있고 곡면 형태의 가이드 패널이 설치되어 있다. 출입구 반대측 벽면에는 터널식 배기팬이 다수 설치되어 있으나 실험에는 사용하지 않았다. 실험은 계사 총 길이 중 20m에 대하여 수행하였으며 실험 영역의 구분을 위하여 방수막 등을 이용하여 구획을 나누었다. 실험 영역 체적은 1312m³이다.



(a) 실험 육계사 전경



(b) 입기 슬롯



(c) 계사 측면 입기 슬롯 및 배기팬 위치



(d) 설치된 배기팬 모습

Fig. 3.4.4. Jet drop distance 실험 육계사 전경 및 환기구



(a) 실험 영역 구분을 위한 방수막 설치



(b) 방수막 설치 완료 전경



(c) 터널 배기팬 틈새 시공



(d) 터널 배기팬 틈새 시공

Fig. 3.4.5. 실험 영역 구분을 위한 방수막 설치 전경 및 터널 배기팬 틈새 시공

상기 그림과 같이 실험 영역의 구분을 위하여 U 볼트 및 방수막을 설치하여 계사 내 독립된 실험 공간을 마련하였으며 터널 배기팬의 경우 틈새 바람 누출 등을 방지하기 위하여 판넬 등을 이용하여 상기 사진과 같이 시공하였다.



(a) 팬 풍량 측정을 위한 실험기구 설치



(b) Manometer를 이용한 풍압/풍량 측정

Fig. 3.4.6. 실험 영역 구분을 위한 방수막 설치 전경 및 터널 배기팬 틈새 시공

실험에 앞서 측면 배기팬의 풍량을 측정하였으며 그 결과는 다음과 같다. 배기팬의 풍량 측정은 Manometer (TSI Inc., USA) 및 자체 제작한 풍량 측정 장치를 이용하여 실시간 유량을 측정하였으며 그 결과는 팬 최대 출력 당시 평균 10,448.95m³/h, 표준편차 104.46로 나타났다.

환기팬이 작동할 때 음압에 의하여 입기 슬롯으로부터 유입되는 외기의 쾌적 측정을 위하여 다음 그림과 같은 실험대를 설치하였으며 두 기의 입기 슬롯을 선택하여 각각의 중앙부, 입기 슬롯 사이의 벽면에서의 중앙부를 각각 선택하여 총 4줄의 실험대를 구성하였으며 각 실험대에는 50cm 간격으로 t-type 열전대(thermocouple)를 설치하였다. 총 60개 열전대는 각각 Data-logger (Yokogawa Inc., Japan; Campbell Inc., USA)에 연결하여 실시간으로 길이 방향에 따른 온도값을 모니터링 하도록 실험을 구성하였다. 각각의 열전대는 목재를 이용하여 계군의 평균 높이를 40cm로 가정하여 바닥으로부터 해당 높이에 위치하게끔 설치하였다.

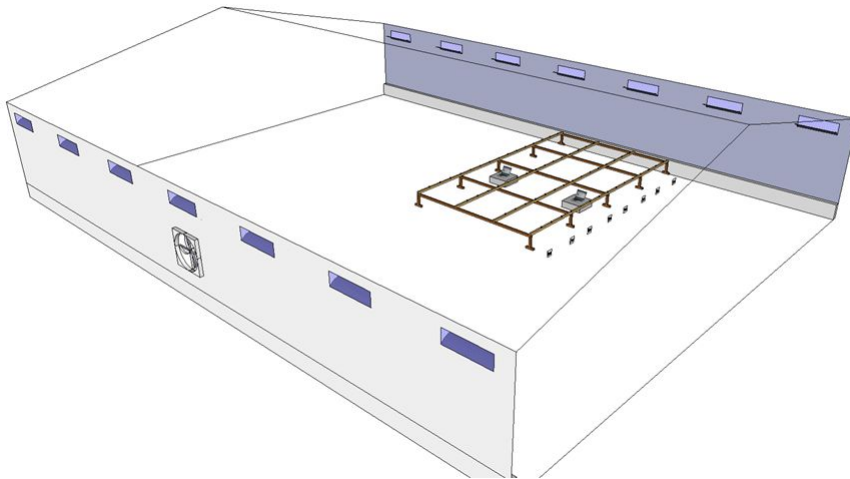


Fig. 3.4.7. Jet drop distance 측정 실험 개요

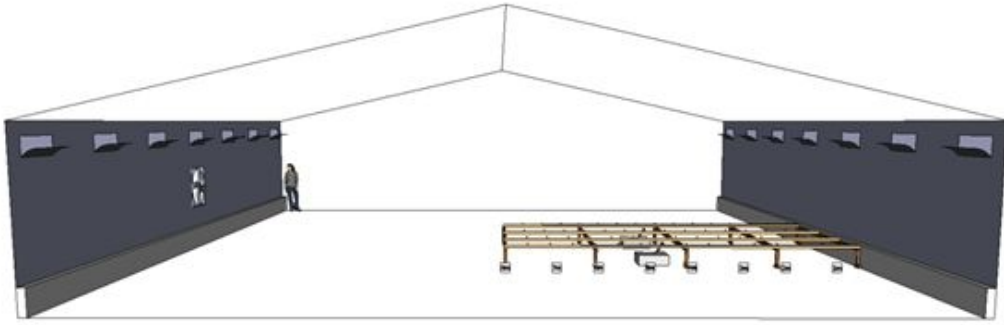


Fig. 3.4.8. Jet drop distance 측정 실험 개요 정면 모습

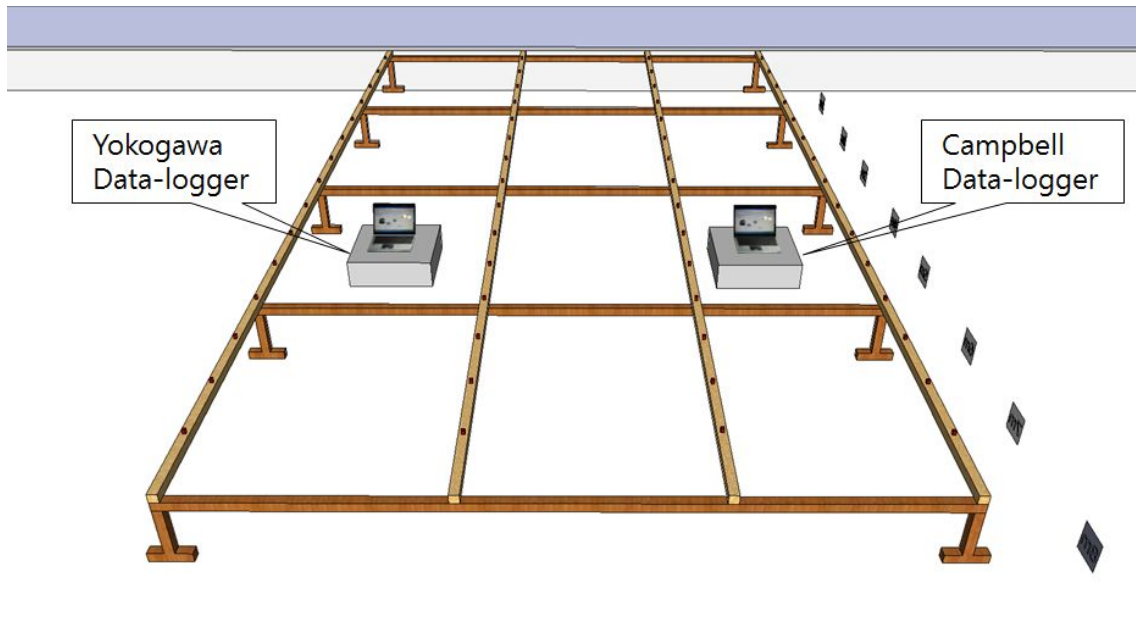


Fig. 3.4.9. t-type thermocouple 및 데이터 로거 설치 모습



(a) 열전대 설치



(b) 열전대 및 데이터 로거 설치

Fig. 3.4.10. Jet drop distance 측정을 위한 열전대 및 데이터 로거 설치 모습

초기 실험은 환기팬 작동 후 입기 슬롯을 개방한 후 입기되는 외기에 따른 온도 분포를 측정함과 동시에 정성적인 거리 산출을 위하여 연기 발생기를 이용하여 계사 외부에서 입기 슬롯으로 발생한 연기를 투입하였으나 가시적인 판별이 용이하지 않아 이후 실험에서 정량적인 온도 분포 측정만 실시하였다.

실험 조건은 입기 슬롯의 가이드 판넬을 기준으로 입기 각도 3종류 (45, 60, 90도), 내부 온도 2종류 (25℃, 20℃)로 구성하였으며 각 길이 방향별 열전대를 통한 실시간 온도 모니터링을 통하여 환기 시스템의 작동 후 급격한 온도 하락 구간이 발생하는 지점을 Jet drop distance 지점으로 판정하고자 하였다. 내부 온도는 경우 온풍기를 이용하여 실험 영역을 가온 후 다 측정에서의 온도 측정을 통하여 실험 조건을 구성하였다.

Jet drop distance가 발생한 지점의 판정은 다음과 같은 순서로 진행되었다. 먼저 데이터로거에 기록된 온도 값 추이를 통하여 급격한 온도 변곡점이 발생하는 지점, 즉 외기가 바닥면에 도달하여 온도 하락을 야기 시켰다고 판단되는 시점에서의 전후 각 15초, 30초 구간의 데이터를 추출하였다. 그 후 첫 번째로 변곡점과 최후 마지막 시점에서의 온도 편차를 산출하여 최고 온도 편차라 발생하는 지점을 Jet drop distance가 발생한 지점이라 산정하고자 하였으며 두 번째 방법으로 1초 단위로 모니터링 된 온도 데이터를 토대로 각 time-step 별 온도 편차를 계산하여 길이 방향 중 온도 편차의 값이 가장 크게 발생한 지점을 산출 후 해당 시간 동안 최고 온도 편차가 가장 다수 발생한 지점을 Jet drop distance가 발생한 지점으로 산정하고자 하였다.

내부 온도 20℃, 입기 슬롯 각도 90도 조건 일 때 입기 슬롯 중앙부를 중심으로 길이 방향 별 온도 모니터링을 통한 결과는 다음과 같다.

Table. 3.4.1. Temperature difference between a point of inflection of temperature curve and last value of monitored temperature when internal temperature is 20°C and slot angle is 90° (middle of slot, Campbell data-logger)

No.	Thermocouple No. and difference of temperature difference														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
length (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
temperature difference(°C)	0.5	1.1	1.2	1.0	0.4	0.7	0.9	0.7	0.4	0.6	0.8	0.6	0.4	0.8	0.8

Jet drop distance를 산출하기 위한 첫 번째 방법으로 데이터로거에 기록된 온도 데이터를 토대로 온도-시간 그래프를 작성하고 이때 발생하는 변곡점, 즉 급격한 온도 하락이 발생하는 시점에서의 온도 값과 모니터링 구간 중 최후 온도 값과의 편차를 통하여 가장 큰 편차가 발생한 영역이 목표 구간이라는 가정 하에 해당 조건을 대입하여 산출한 결과 입기 슬롯이 위치하는 측벽으로부터 1.0~2.0m 떨어진 (최고 온도 편차는 1.5m) 영역에서 Jet drop distance가 발생하였을 것이라 추정할 수 있다. 동일한 조건일 때 두 번째 방법, 즉 모니터링 된 온도-시간 데이터에서 각 time-step 간 온도 편차를 계산하여 가장 높은 편차를 보이는 구간을 선정하고 최빈의 편차수를 보이는 영역을 Jet drop distance가 발생한 영역이라 가정할 때 그 결과는 다음과 같다.

Table. 3.4.2 Temperature difference of each time step when internal temperature is 20°C and slot angle is 90° (middle of slot, Campbell data-logger)

No.	Thermocouple No. and difference of temperature difference														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
length (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
Time															
1	-0.01	-0.02	0.00	-0.03	0.02	-0.01	-0.02	-0.01	0.03	-0.01	-0.01	-0.02	0.00	-0.03	-0.02
2	-0.02	0.02	0.04	-0.04	0.01	0.01	-0.01	0.00	0.01	-0.01	-0.01	0.01	0.00	-0.01	-0.02
3	-0.03	0.03	-0.03	-0.01	0.02	0.02	-0.03	-0.01	0.02	-0.01	-0.01	-0.02	0.01	-0.03	-0.03
4	-0.02	-0.05	-0.06	-0.01	-0.01	0.01	-0.03	-0.02	0.02	-0.01	-0.03	-0.02	-0.01	-0.02	-0.02
5	-0.01	-0.07	-0.05	-0.04	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.04
6	-0.02	-0.06	-0.06	-0.03	-0.02	-0.01	0.01	-0.03	0.00	-0.02	-0.04	0.01	-0.02	-0.02	-0.05
7	-0.04	-0.07	-0.02	-0.01	-0.01	-0.03	0.00	-0.01	0.02	0.00	-0.06	-0.03	0.00	-0.03	-0.05
8	-0.01	-0.10	-0.09	-0.03	-0.03	-0.03	-0.01	0.00	-0.01	-0.02	-0.06	-0.01	0.00	-0.01	-0.01
9	-0.03	-0.09	-0.12	-0.05	-0.03	-0.03	-0.04	-0.03	-0.03	-0.01	-0.07	-0.01	-0.04	-0.04	-0.04
10	-0.02	-0.03	-0.07	-0.10	-0.01	-0.01	-0.03	-0.02	-0.01	0.00	-0.02	-0.02	-0.01	-0.05	-0.02
11	-0.04	-0.07	-0.12	-0.06	-0.04	-0.06	-0.06	-0.06	-0.02	-0.04	-0.05	-0.05	-0.03	-0.04	-0.04
12	-0.02	-0.07	-0.07	0.00	0.01	-0.04	-0.05	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.02	-0.02
13	-0.03	-0.08	-0.06	-0.04	-0.02	-0.04	-0.06	-0.03	-0.02	-0.02	0.00	-0.02	-0.02	-0.03	-0.02
14	-0.01	-0.06	-0.08	-0.04	-0.02	-0.02	-0.05	-0.05	-0.02	-0.02	-0.03	-0.04	-0.02	-0.04	-0.03
15	-0.02	-0.03	-0.05	-0.01	-0.01	-0.03	-0.04	-0.04	-0.02	-0.01	0.00	0.00	-0.02	-0.05	-0.02
16	-0.01	-0.02	-0.04	-0.01	-0.01	-0.02	-0.03	-0.03	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02	-0.02	-0.04	-0.03
17	-0.11	-0.05	-0.04	-0.03	-0.03	-0.02	-0.04	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.05	-0.04
18	0.00	-0.07	-0.03	-0.05	-0.02	-0.01	-0.03	-0.03	0.02	-0.04	-0.02	-0.01	-0.04	-0.06	-0.02
19	0.00	-0.01	0.00	-0.04	-0.01	0.00	-0.02	-0.05	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01	0.00	-0.03	-0.02
20	-0.01	-0.04	0.01	-0.03	0.00	0.00	-0.02	-0.04	0.00	-0.01	-0.01	0.00	-0.02	-0.01	0.00
21	-0.05	-0.04	-0.02	-0.07	-0.04	-0.04	-0.05	-0.07	-0.06	-0.05	-0.07	-0.04	-0.04	-0.04	-0.02
22	-0.02	-0.04	0.00	-0.01	-0.03	0.01	-0.01	-0.04	-0.02	-0.03	0.00	-0.03	-0.01	-0.02	-0.02
23	-0.03	-0.04	-0.03	-0.01	-0.04	-0.03	-0.03	-0.02	-0.04	-0.02	-0.06	-0.06	-0.03	-0.02	-0.05
24	-0.01	0.00	-0.02	-0.01	0.00	-0.02	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.04	-0.04	-0.01	0.00	-0.02
25	-0.01	0.02	-0.03	-0.03	-0.02	-0.06	-0.01	-0.01	-0.03	-0.01	-0.05	-0.06	-0.01	-0.03	-0.02
26	0.03	0.01	-0.04	-0.04	-0.01	-0.06	-0.03	-0.01	0.00	-0.04	-0.04	-0.05	-0.02	-0.02	-0.03
27	0.04	0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.05	-0.06	-0.02	-0.02	-0.01	-0.02	-0.03	-0.02	-0.01	-0.02
28	0.01	0.00	-0.02	-0.04	-0.02	-0.05	-0.03	0.00	-0.01	-0.02	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.01
29	-0.01	-0.04	-0.04	-0.07	-0.03	-0.05	-0.04	-0.04	-0.05	-0.04	-0.01	0.00	-0.02	-0.01	-0.03
30	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.02	-0.03	-0.04	-0.02	-0.02	-0.06	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
Count	2	9	8	4	-	2	2	4	-	1	3	3	-	2	1

두 번째 방법에 의하여 최고 온도 편차에 대한 최빈수를 보이는 구간을 산정하여 보면 입기 슬롯이 위치하는 측벽으로부터 1.0~1.5m 떨어진 지점에서 Jet drop

distance가 발생한 것으로 판단되어 첫 번째 방법으로 산출된 값과 유사한 결과를 도출할 수 있었다.

내부 온도 20℃, 입기 슬롯 각도 90도 조건 일 때 입기 슬롯 사이 측벽의 중앙부를 중심으로 길이 방향 별 온도 모니터링을 통한 결과는 다음과 같다.

Table. 3.4.3. Temperature difference between a point of inflection of temperature curve and last value of monitored temperature when internal temperature is 20℃ and slot angle is 90° (middle of wall, Campbell data-logger)

No.	Thermocouple No. and difference of temperature difference														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
length (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
temperature difference(℃)	1.1	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2	1.1	0.7	0.9	0.7	0.7	0.05	0.04	0.5	0.5

입기 슬롯 사이에 존재하는 측벽 중앙부에 위치하는 길이방향 별 열전대 데이터를 토대로 온도 변곡점과 최후 데이터 사이의 온도 편차를 토대로 가장 높은 온도 하락율을 보인 구간은 대략 측벽으로부터 1.0~2.5m 떨어진 곳에 위치하는 것으로 나타났다. 슬롯 중심부에서의 결과 치와는 다소 넓은 범위의 온도 하락 구간을 갖는 것으로 나타났다. 해당 경우에 대하여 각 time-step 간 온도 편차의 최빈수를 토대로 Jet drop distance를 산출하는 방법을 적용한 결과는 다음과 같다. 이 경우 최빈수를 보이는 구간은 벽면으로부터 2.5m 떨어진 곳으로 첫 번째 방법에 의해 도출된 결과와는 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다.

Table. 3.4.4. Temperature difference of each time step when internal temperature is 20°C and slot angle is 90° (middle of slot, Campbell data-logger)

No.	Thermocouple No. and difference of temperature difference														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
length (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
Time															
1	-0.01	0.00	-0.01	-0.04	-0.01	-0.03	-0.04	-0.01	0.00	0.01	-0.02	-0.01	-0.02	-0.02	-0.03
2	-0.03	-0.02	-0.01	0.00	-0.02	-0.04	-0.05	-0.02	0.00	0.01	-0.01	-0.02	0.00	0.01	0.00
3	-0.03	-0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.02	-0.03	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	-0.01	-0.03	-0.01
4	-0.04	-0.02	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.06	-0.01	-0.02	0.00	-0.01	-0.02	0.00	0.00	-0.01
5	-0.03	-0.02	-0.04	-0.04	-0.03	-0.06	-0.05	-0.02	-0.02	-0.02	-0.04	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02
6	-0.02	-0.02	-0.06	-0.04	-0.05	-0.04	-0.03	-0.03	-0.02	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01	-0.03	-0.02
7	-0.02	-0.04	-0.02	-0.04	-0.06	-0.04	-0.03	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	-0.02	-0.03	-0.01
8	-0.01	-0.04	-0.04	-0.06	-0.05	0.00	-0.01	-0.03	-0.03	-0.02	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.00
9	-0.04	-0.06	-0.05	-0.08	-0.08	-0.02	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.01	-0.02
10	-0.03	-0.03	-0.03	-0.04	-0.06	-0.03	0.01	-0.03	-0.02	-0.02	-0.03	-0.01	0.00	-0.03	-0.02
11	-0.10	-0.08	-0.08	-0.07	-0.05	-0.10	-0.07	-0.06	-0.05	-0.06	-0.05	-0.03	-0.03	-0.05	-0.04
12	-0.08	-0.06	-0.03	-0.04	0.00	-0.05	-0.03	0.00	-0.05	-0.04	-0.03	-0.02	0.00	-0.02	-0.02
13	-0.09	-0.09	-0.07	-0.08	-0.01	-0.03	-0.06	-0.02	-0.06	-0.05	-0.02	-0.01	-0.03	-0.01	-0.02
14	-0.05	-0.09	-0.08	-0.09	-0.05	-0.03	-0.06	-0.02	-0.05	-0.03	-0.04	-0.02	-0.03	-0.04	-0.04
15	-0.04	-0.07	-0.04	-0.08	-0.03	-0.05	-0.06	0.00	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02
16	-0.03	-0.04	-0.06	-0.05	-0.03	-0.05	-0.04	-0.01	-0.05	-0.05	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	-0.03
17	-0.04	-0.07	-0.02	-0.04	-0.05	-0.05	-0.05	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.01	-0.03	-0.02	-0.04
18	-0.05	-0.07	-0.07	-0.02	-0.06	-0.08	-0.05	-0.03	-0.04	-0.06	-0.04	-0.03	-0.03	-0.04	-0.03
19	-0.02	-0.05	-0.03	0.00	-0.05	-0.04	-0.02	-0.03	-0.02	-0.03	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01	0.00
20	-0.03	-0.05	-0.06	-0.03	-0.02	-0.02	-0.03	0.00	-0.01	0.00	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	0.00
21	-0.05	-0.09	-0.06	-0.06	-0.10	-0.06	-0.04	-0.04	-0.03	-0.05	-0.05	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03
22	-0.07	-0.01	-0.01	-0.06	-0.05	-0.04	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.02	0.00	0.00
23	-0.03	-0.02	-0.04	-0.06	-0.09	-0.03	-0.04	-0.04	-0.03	-0.04	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02
24	-0.10	-0.02	0.01	-0.02	-0.05	0.00	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	-0.02	0.00	-0.01	0.00	0.00
25	-0.09	-0.04	-0.05	-0.05	-0.06	-0.05	-0.04	-0.03	-0.04	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01
26	-0.02	-0.06	-0.06	-0.05	-0.06	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.01	-0.02	-0.01	0.00	-0.01
27	0.01	-0.02	-0.04	-0.03	-0.05	-0.04	-0.01	-0.04	-0.04	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	0.00	0.01
28	0.00	-0.03	-0.02	-0.02	-0.04	-0.03	0.00	-0.02	-0.02	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
29	0.00	-0.02	-0.05	-0.04	-0.03	-0.03	-0.05	-0.04	-0.04	-0.03	-0.02	-0.03	-0.01	0.00	-0.02
30	0.02	-0.04	-0.04	-0.01	0.01	-0.03	-0.04	-0.03	-0.03	-0.01	-0.02	-0.01	0.00	-0.01	-0.01
Count	7	5	6	5	9	3	4	-	-	-	-	-	-	1	-

Yokogawa 사의 데이터 로거를 이용한 온도 모니터링 결과의 경우 다음과 같이 기록된 온도 값의 최소 독치가 0.1°C 단위로써 이 경우 데이터에 대한 판독이 용이하

지 않아 결과 분석에는 활용하지 않기로 결정하였다.

Table. 3.4.5. Temperature difference of each time step when internal temperature is 20°C and slot angle is 90° (middle of slot, Yokogawa data-logger)

No.	Thermocouple No. and difference of temperature difference														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
length (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
Time															
1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	-0.1
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1
14	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1
16	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0
17	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0
19	-0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1
22	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
24	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	-0.1
26	-0.2	0.0	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
29	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0
30	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	-0.1
Count	8	7	8	8	6	5	7	10	7	4	2	5	4	4	5

동일한 방법에 의하여 내부 온도 20℃, 입기 슬롯 각도 90도의 동일한 조건일 때 첫 번째 및 두 번째 방법에 의하여 산출한 Jet drop distance는 측벽으로부터 (0.5m, 0.5m), (3m, 0.5m)로 다소 결과 값의 차이를 보였다.

내부 온도 20℃, 입기 슬롯 각도 45도시 조건일 경우 그 결과는 각각 (0.5m, 6m), (1m, 1.5m)로 서로 상이한 결과 값을 보였으며 내부 온도 20℃, 입기 슬롯 각도 60도 조건일 경우 (5.5m, 0.5m), (0.5m, 0.5m), (0.5m, 0.5m)로 타 실험 조건에 비하여 균일한 결과치를 얻었다고 볼 수 있으나 입기 슬롯 각도에 따른 차이는 두드러지지 않았다. 내부 온도가 25℃ 조건일 경우 첫 번째 방법의 경우 모든 실험 구조에 대하여 온도 편차가 두드러지지 않았으며 두 번째 방법을 적용할 경우 역시 최빈값을 보이는 영역이 다수 존재하는 등 결과치를 도출하는데 한계점이 발견되었다.

Jet drop distance를 산출하기 위한 부안 현장 실험 결과 다음과 같은 사항을 지적할 수 있었다.

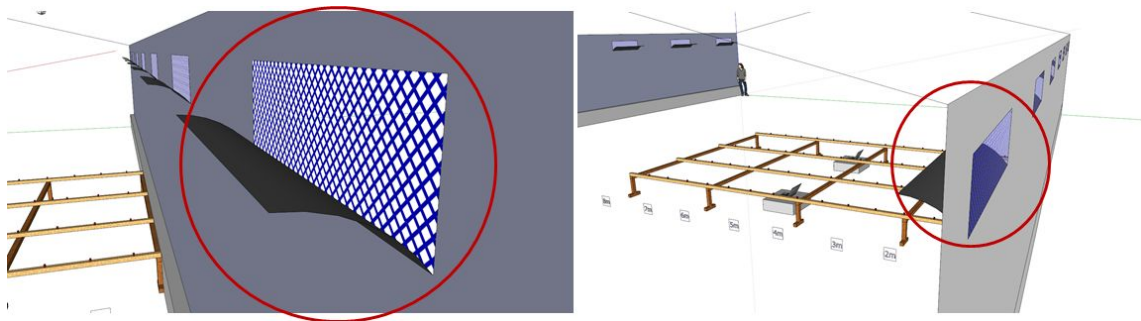


Fig. 3.4.11. 부안 육계사 입기 슬롯 현황

상기 그림에서 확인할 수 있듯, 입기 슬롯 양측의 기류를 유도하기 위한 가이드 판넬이 존재하지 않았으며 입기 슬롯 외부 또한 실험 당시 신축 공사 중인 계사 사정상 입기 슬롯의 외부 부속품; 즉 외기가 자연풍에 의하여 직접 유입되는 것을 방지하기 위한 부분이 시공되지 않아 당시 기상 상황 상 자연환기에 의한 기류의 유입 또한 무시 하지 못할 것이라 판단되었다. 또한 Campbell 사의 데이터로거의 최소 독치가 0.01℃ 단위인데 반하여 Yokogawa 사의 데이터로거의 경우 최소 독치가 0.1℃ 단위로써 길이 방향에 따른 온도 하락 구간을 도출하는데 한계점이 존재하였다. 이는 향후 Jet drop distance 실험을 진행하는데 있어 보다 정밀한 독치를 제공하는 실험 장비의 사용이 필수적이라 지적할 수 있다. 또한 상기 그림과 같이 외기의 영향을 많이 받을 수 있는 단순 매쉬 망이 설치된 입기 슬롯에서의 Jet drop distance를 산출하는 데는 많은 한계가 존재하는 것을 확인하였다. 이에 본 연구에서는 현장 실험을 통한 거리 산출에 앞서 전산유체역학 등과 같은 간접적인 수치해

석적 방법을 통하여 입기류 도달거리 산출의 가능성을 검토해볼 필요가 있다고 판단하였다.

3. 전산유체역학을 이용한 Jet drop distance 이론의 적용 가능성 검토

전산유체역학 시뮬레이션을 이용한 Jet drop distance 이론의 적용 가능성 검토를 위한 대상 시설은 음성 육계사 시설 중 일반 강제 환기식 계사이다. 해당 계사는 동절기 크로스 환기 방식에 따라 측벽 배기팬을 이용한 음압식 환기 구조로 양쪽 측벽 상단에 존재하는 입기 슬롯을 통하여 외기가 유입된다. 총 5개의 배기팬이 길이 방향으로 동일 간격으로 배치되어 있으며 이로 인하여 배기 팬을 중심으로 내부 기류 및 열환경이 반복적으로 조성될 것이라는 판단 하에 배기팬 1기를 중심으로 전체 길이의 1/5 크기인 14m 길이를 연구 영역으로 설정하였다.

연구 대상 영역의 기본 골격, 팬, 입기 슬롯 등의 환기 구조의 설계 및 수치 계산을 위한 격자망 설계, 경계조건의 정의 등은 GAMBIT을 사용하였다. 격자망은 썸기(Wedge) 및 육면체(Hexahedron) 형태로 구성하였으며 설계된 격자망의 크기는 $1.25 \times 10^{-6} \sim 4.04 \times 10^{-3} \text{m}^3$ 로써 시뮬레이션의 수렴에 지대한 영향을 미치는 입기구 인근에서 보다 조밀한 형태의 비등방 격자망을 구성하였다. 격자의 총 개수는 약 160만개로 설계하였다.

전체 계산 영역은 Fig. 3.4.12 과 같으며, 입기 슬롯의 경우, 입기 각도를 설계 변수로 적용하기 위하여 경계조건의 변경을 통하여 설계 변수 적용이 가능하도록 그 구조 및 격자를 Fig. 3.4.13과 같이 설계하였다. 실제 음성 육계사의 동절기 환기 운영 조건을 참고하여 배기팬이 설치된 측벽의 경우 총 6구의 입기 슬롯을 개방하였으며 반대편 측벽의 경우 총 8구를 개방한 형태의 환기 구조를 가정하였다.

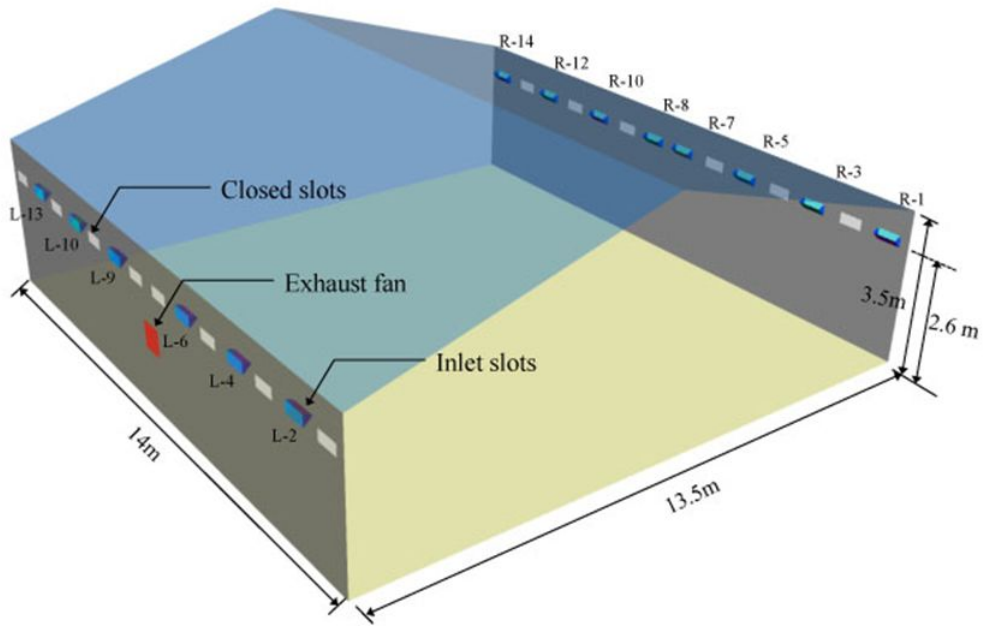


Fig. 3.4.12. 연구 대상 제원 및 입기 슬롯, 배기구 현황

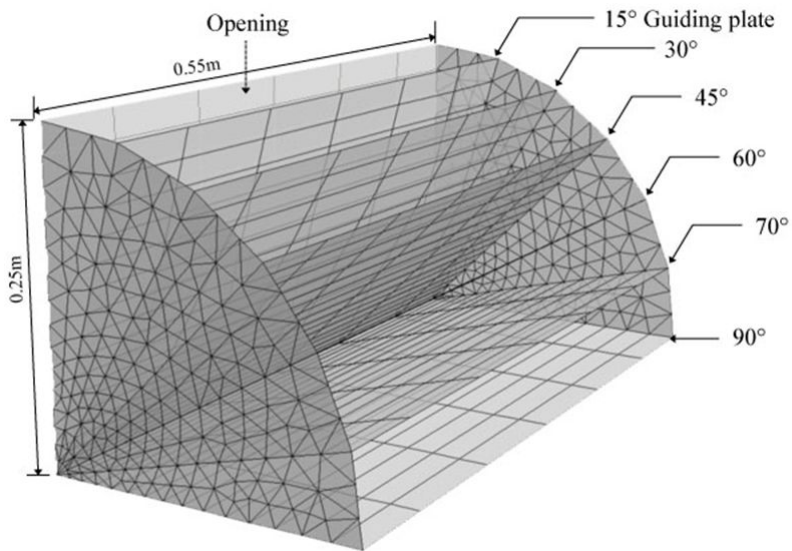


Fig. 3.4.13. 입기 슬롯 각도 조절을 위한 입기 슬롯 골격 및 격자 설계

각 환경 조건에 따른 입기류 도달거리 특성 파악을 위하여 설계 변수는 다음과 같이 설정하였다. 대기 온도의 경우 -15°C , 0°C , 15°C 로 설정하였고 입기 슬롯의 각도는 15° , 30° , 45° , 60° , 70° , 90° 로 총 6가지를 고려하였으며 설계 환기량의 크기

는 시간당 체적 공기 교환율을 기준으로 0.05, 0.075, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30 AER(; Air exchange rate, 회/min)을 변수로 설정하여 총 108가지의 실험 조건을 구성하였다. 비정상상태에 대한 해석을 수행하였으며 초기 유동이 존재하지 않는 상태에서 수 초 동안 환기 팬을 작동하여 내부 기류 패턴이 형성되었을 때 계군 평균 높이 즉, 바닥으로부터 40cm떨어진 높이에서의 온도 변화를 모니터링 하였다. 계군 바닥의 온도는 일반적인 육계의 2~3주령 시 평균 사육 권장 온도를 기준으로 25℃를 가정하였다. 입기류 도달거리의 산정은 먼저 정성적인 유동 및 온도장 분석을 통하여 Free-jet 조건에 부합되는 경우를 추출하고 계군 높이에서의 온도 값을 토대로 정성적인 결과와 함께 각 환경 조건에 따른 입기류 도달거리 값을 제시하고자 하였다. 시뮬레이션에 사용된 일부 물성치 및 초기조건, 설계 변수는 다음 표와 같다.

Table. 3.4.6. 시뮬레이션 초기 조건 및 기본 물성치

Contents		Values
Temperature	Outdoor air temp.	-15, 0, 15℃
	Wall temp.	Depending on outdoor temp.
	Floor temp.	25℃
	Indoor air temp.	25℃
Density	Air (-15℃)	1.367 kgm ⁻³
	Air (0℃)	1.293 kgm ⁻³
	Air (15℃)	1.225 kgm ⁻³
Specific heat of air (15℃)		1006.439 Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Thermal conductivity of air (15℃)		0.024 m ⁻¹ K ⁻¹
Designed ventilation rates (air exchange rate)		0.05, 0.075, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30 AER (min ⁻¹)
Turbulence model		RNG k-ε model

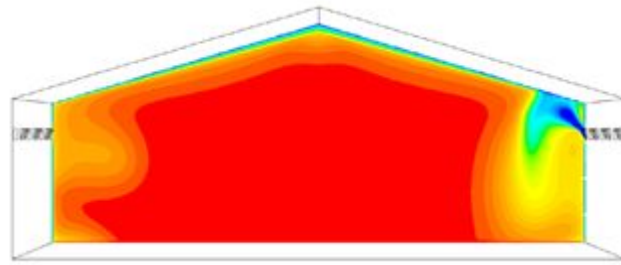
Table. 3.4.7. 설계환기량 (AER)에 따른 풍량 및 팬에서의 평균 풍속 크기

AER	Flow rate (m ³ min ⁻¹)	Average fan velocity magnitude (ms ⁻¹)
0.050	42.53	1.97
0.075	63.79	2.95
0.100	85.05	3.94
0.150	127.58	5.91
0.200	170.10	7.88
0.300	255.15	11.81

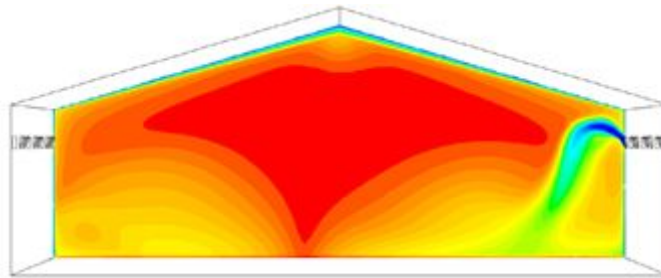
유입되는 외기의 온도, 입기 슬롯의 설치 각도, 설계 환기량 등 설계 조건 별 총 108가지 구조에 대하여 각각의 입기류 도달거리 산정에 앞서, 음압식 환기 시스템이 작동되는 시간에 따라 형성되는 유동장 및 온도장 분포를 토대로 해석 대상이 되는 적정 시간에 대한 선정 작업을 실시하였다. 먼저 본 연구에서는 계사 영역 내부에 형성되는 온도장이 유동장의 형태에 지배됨을 확인하였고 이에 각 구조별 온도장을 토대로 정성적인 분석을 실시하고자 하였다.

Fig 3.4.13은 환기시스템이 작동된 후, 각각 10초, 20초, 60초 후의 계사 내부에 형성되는 온도장 분포로써, 환기가 진행됨에 따라 입기된 기류의 궤적 및 그 형태가 변화되는 현상을 확인할 수 있었다. 환기시스템이 작동된 지 10초 이후의 경우, 입기 윗으로부터 유입되는 기류가 아직 계군 영역에 도달하지 않았음을 확인할 수 있었다. 따라서 계군 높이에서의 계사 폭방향 온도 하락 구간이 명확하게 나타나지 않아 모니터링을 통한 입기류 도달거리의 정량적인 파악이 어려울 것이라 판단되었다. 환기시스템이 작동된 지 60초의 경우 이미 유입된 외기가 계군에 도달한 후, 바닥면에서 확산되어 낮은 온도 분포를 갖는 영역이 넓게 나타나, 입기류가 도달한다고 판단되는 임의 지점을 선택하는데 문제가 있을 것이라 사료되었다. 또한 이 경우 이미 바닥면에서 확산되어 형성된 저온대의 공기층에 의하여 유입되는 외기류의 형태 또한 변화되기 시작함을 확인할 수 있다. 60초 이후의 경우, 과다 환기로 인하여 계사 내부의 온도가 사육 권장 온도 대비 극심하게 낮아지는 현상이 발견되어 계군의 적정 열환경 유지에는 적합하지 않을 것으로 판단되었다. 또한 계군 인근에 형성되는 낮은 온도 값을 갖는 공기 층에 의하여 시설 내부 부력 변화를 야기하고 이로 인하여 입기 슬롯으로부터 유입되는 기류가 계군이 아닌 천정 쪽을 향하여 뿔어나가는 현상도 관측되었다.

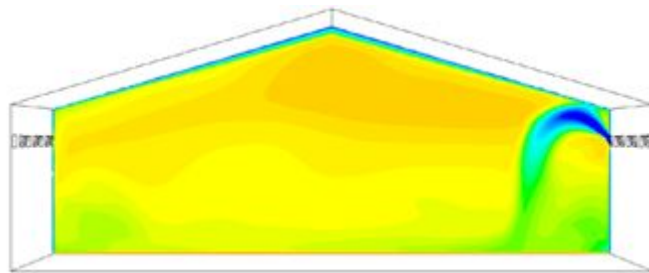
따라서 본 연구에서는 입기류 도달거리 선정을 위한 적정 시간으로써 계군 내 적정 열환경 조성 문제, 온도 모니터링 시 정확한 도달거리 발생 지점의 정량적 분석 문제 등을 고려하여 환기가 진행된 후 20초 당시를 선정하였으며 이는 실제 동절기 계사 환기 운영 조건 즉, 일반적으로 호흡기성 질병 방지 등을 이유로 배기팬 가동시간으로 30초 미만이 추천되는 현실을 고려하였을 때 적절하다고 판단되었다.



(a) 환기시스템 작동 10 sec. 후 온도장 분포



(b) 환기시스템 작동 20 sec. 후 온도장 분포



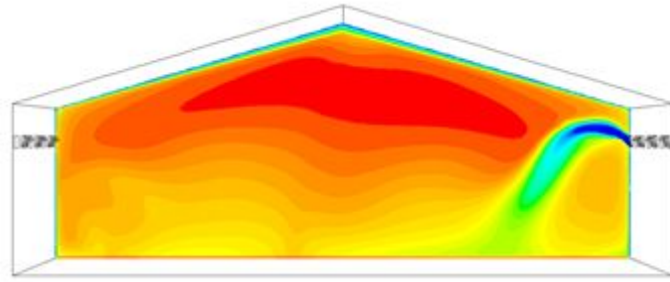
(3) 환기시스템 작동 60 sec. 후 온도장 분포



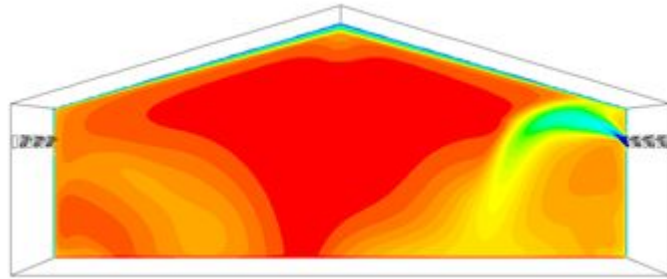
Fig. 3.4.13. 환기 작동 시간에 따른 입기 슬롯(R3)으로 외기가 유입될 때 형성되는 온도장 분포

Fig. 3.4.14는 입기류가 유입되는 입기 슬롯의 설치 각도가 45°, 설계 환기량이 0.15AER 등과 같은 동일 조건일 때 유입되는 외기 온도 값에 따른 대표적인 온도

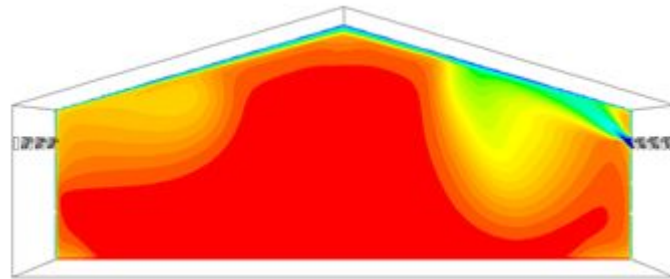
장 분포 결과이다. 일반적으로 대부분의 실험 구조에서 외기 온도가 높아질수록 입기구에서 사출되는 기류가 상대적으로 계사 상부 측을 향하여 뺏어나가는 경향을 확인할 수 있었으며 이는 외기가 환기가 이루어지는 대상 공간으로 유입될 때 자체적으로 갖는 부력 및 모멘텀의 차이에 기인한 결과로 사료된다. 외기 온도 값이 -15°C 일 때 유입된 외기가 계군으로 상대적으로 낮은 온도 값을 가지며 유입되는데, 이는 동절기 외기 온도가 극히 낮을 때 입기 슬롯으로부터 유입된 외기가 측벽을 타고 흘러내리면서 측벽 인근에서 저온대가 형성되고 그로 인하여 닭의 타 영역으로의 스텝현상이 발생하는 현상을 설명해준다. 외기 온도 값이 0°C 안 경우 이전의 -15°C 조건일 때와는 달리 기류가 좀 더 지붕 상단 측을 향한 방향으로 사출되며 이 또한 입기되는 공기 자체가 보유하고 있는 열에너지 등으로 인하여 야기되는 부력(정확히는 온도에 따른 공기 덩어리에 밀도 차에 의하여 형성되는 부력 차에 기인한 결과라고 볼 수 있다. 또한 외기 조건이 15°C 일 경우에는 유입되는 기류가 계군 내로 바로 도달하지 않고 지붕면을 타고 뺏어나가는 현상이 발견되는데 이는 육계 사육에 있어서 계군 내 온도 불균형 해소 및 적정 열환경 조성 등 열적으로는 유리하나 계군 영역에서 발생하는 암모니아, 수분, 각종 분진 등과 같은 유해 물질 제거에 있어서 상대적으로 불리할 것이라 판단된다.



(a) 유입되는 외기의 온도가 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일 때 온도장 분포



(b) 유입되는 외기의 온도가 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일 때 온도장 분포



유입되는 외기의 온도가 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일 때 온도장 분포



Fig. 3.4.14. 입기 슬롯 각도 45° , 설계 환기량 0.15AER 일 때 입기 슬롯(R3)으로 외기가 유입될 때 형성되는 온도장 분포

Fig. 3.4.15는 설계 환기량 0.200AER , 유입되는 외기 온도가 -15°C 등 동일 조건 일 때, 슬롯의 설치 각도에 따른 온도장 분포이다. 해당 설계 조건의 경우 슬롯 각도가 $15, 30^{\circ}$ 일 때, 입기류로부터 사출된 기류가 지붕 천정을 타고 뺏어나감으로써 Free-jet 조건에 위배되는 형태로 존재하였다. 이 경우, 계사 내 전체적인 열환경의 적정성에는 타 슬롯 각도를 적용하였을 때 비하여 유리할 수 있으나 바닥과 인접한 계군 내 발생하는 수분, 암모니아, 분진 등의 제거 및 신선한 공기 공급면에 있어 불리할 것으로 사료된다.

해당 조건에서 입기 각도가 45°일 때 다른 입기 각도 조건과 비교하여 입기류 도달거리 가장 길게 나타났으며, 입기 각도가 증가할수록 도달거리는 점차 감소하고 동물 군에 도달하는 입기류의 온도 또한 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 동물군에 도달하기 전까지 공기 중에 머무는 시간이 증대됨에 따라 따뜻한 공기 층과의 열교환 확률이 증가되기 때문이다. 따라서 설치 각도가 입기류 도달거리 및 동물 군에 접촉하는 온도 분포를 결정하는 요소임을 상기시키는 결과라고 볼 수 있다.

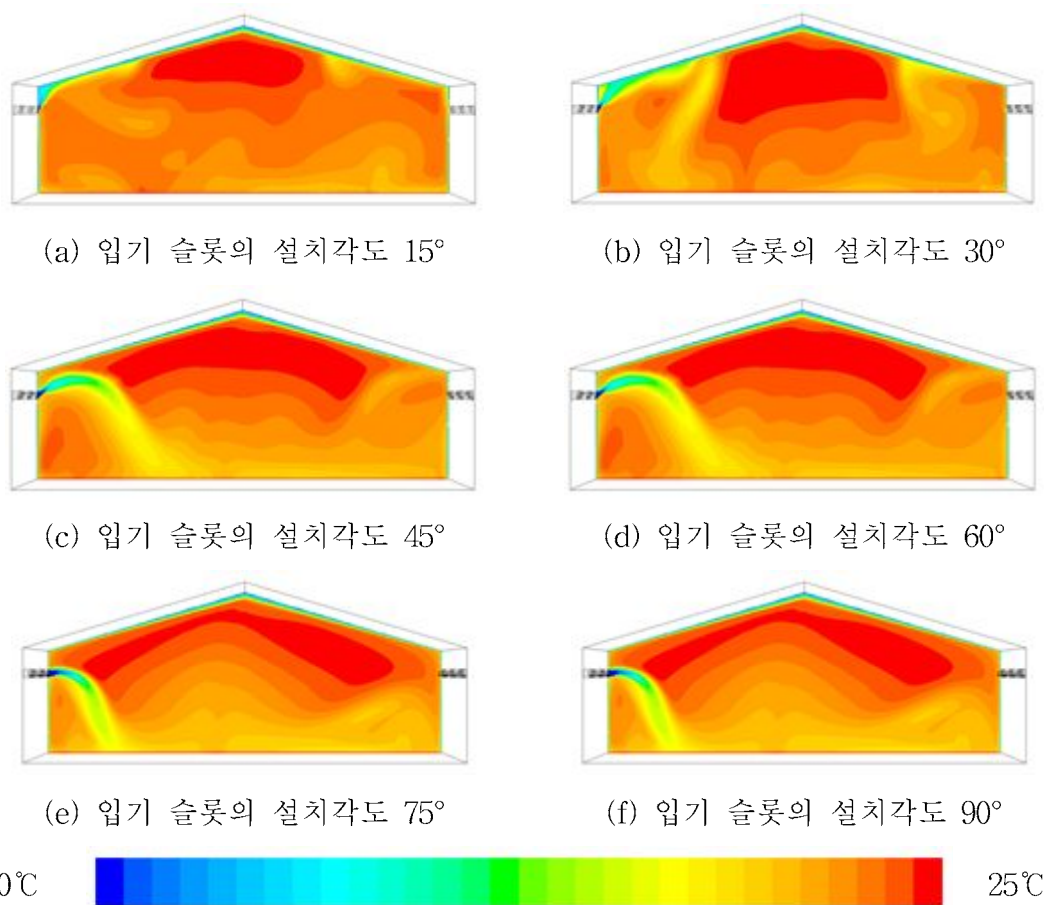


Fig. 3.4.15. 입기 슬롯 설치 각도에 따른 입기 슬롯 (L4)으로부터의 외기가 유입될 때 형성되는 온도장 분포

Fig. 3.4.16은 60°의 입기 슬롯에 대하여 -15°C의 외기 조건일 때, 설계 환기량에 따른 내부 온도장 분포이다. 0.05, 0.075AER일 경우 입기류가 대부분 뺏어나가지 못하고 벽면을 타고 흘러내리는 형태를 보였다. 국내 동절기 설계 환기량으로 추천되는 0.05~0.10AER을 환기 조건으로 설정할 경우 저온의 외기가 지붕 상단 측에 존

재하는 고온의 공기와 열교환을 하지 못하고 벽체 인근의 동물 군에 직접적으로 도달하는 것이 확인되었다. 따라서 이 영역에 위치하는 동물 군의 열적 스트레스 증가 및 호흡기성 질병의 발병 가능성이 상대적으로 높다고 유추할 수 있다. 이는 실제 동절기 계사 운영 시 주로 보고되는 측벽 인근에서의 높은 폐사율, 계군의 응집 및 특정 영역의 회피 현상 등을 뒷받침하는 결과라고 판단할 수 있다. 이후 환기량이 증가할수록 입기류 도달거리가 점차 증가하였으나 시간당 절대적인 공기 교환량이 증가함에 따라 계사 내부의 평균 온도 또한 점차 감소하여 사육 권장 온도 값에 비하여 극히 낮은 온도 값 분포를 보이는 것으로 나타났다.

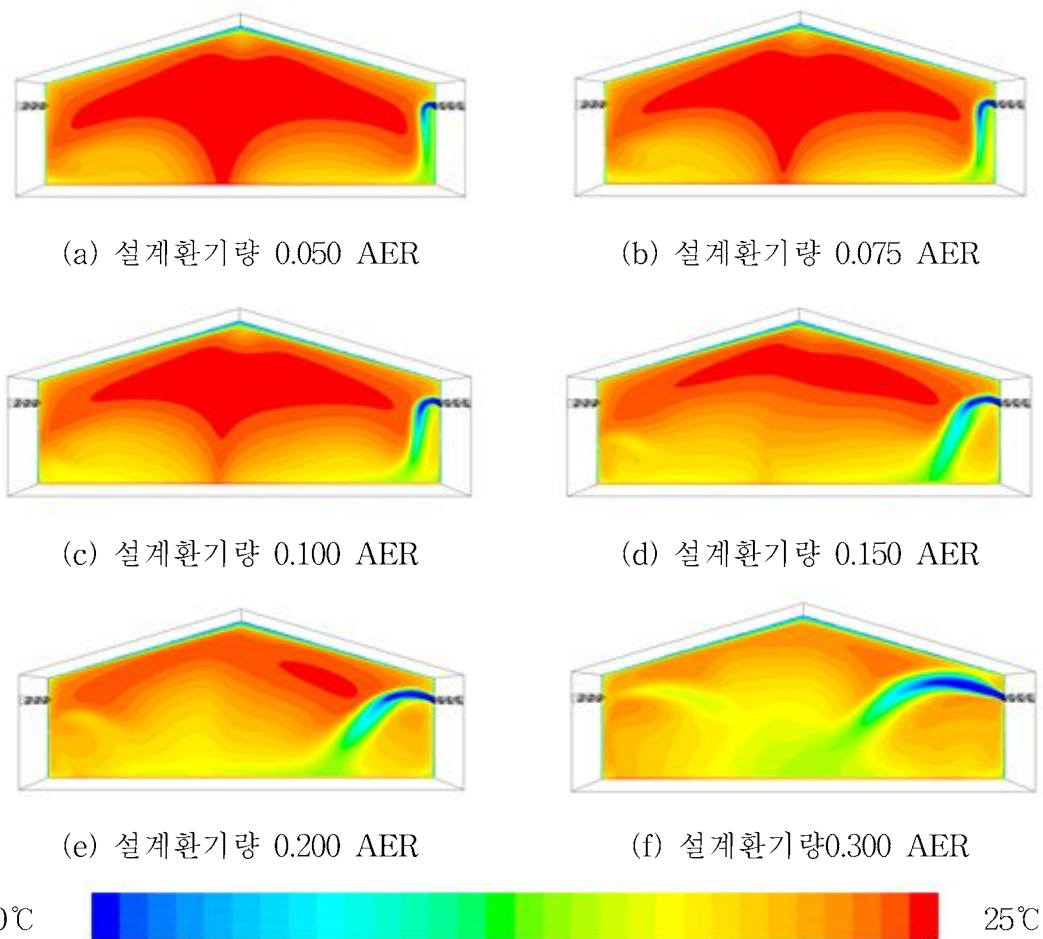


Fig. 3.4.16. 설계 환기량에 따른 입기 슬롯 (R3)으로부터의 외기가 유입될 때 형성되는 온도장 분포

환경 조건 별 입기류 도달거리의 산정을 위하여 시뮬레이션 연산이 수행되는 동안 계군 높이 즉, 바닥으로부터 40cm 높이에서 계사 폭 방향에 따른 온도 분포 데이터

를 실시간으로 모니터링하였다. 시뮬레이션이 수행되는 동안 계군 높이에서 실시간으로 기록하고 파일 형태로 출력하여 분석한 폭 방향 온도 데이터 그리고 정성적인 온도장을 바탕으로, 구조 별 R3, R7, L4, L6 입기 슬롯에서의 입기류 도달거리를 산정하고자 하였으며 그 대표적인 결과는 Fig. 3.4.17~Fig. 3.4.19와 같다.

입기 슬롯의 설치 각도가 45°, 0.15AER의 환기량 그리고 외기 조건이 -15℃일 때 R7 입기 슬롯에서 형성되는 온도장 분포 및 계군 높이에서의 온도 데이터는 Fig. 3.4.17과 같다. 해당 조건의 경우, 입기 슬롯으로부터 유입되는 외기의 궤적이 확연하게 구별되는 정성적 결과를 얻을 수 있었으며 계사 폭 방향 계군 높이 온도 모니터링 결과로부터 온도 하락 구간이 발생하는 영역을 확실하게 인지할 수 있었다. 상기 정성적 및 정량적 결과로부터 해당 설계 조건의 경우 슬롯으로부터의 입기류 도달거리 값은 3.91m 라는 결과를 용이하게 산출할 수 있다.

Fig. 3.4.18의 경우, 입기 슬롯의 설치 각도가 60°, 0.05 AER의 설계 환기량, 외기 조건이 -15℃일 때 R3에서의 결과로써, 정성적 결과를 통하여 입기구로부터 사출되는 기류가 측벽 면을 타고 흘러내리는 형태로 존재하는 것을 확인할 수 있었다 이는 앞선 경우와 비교하여 상대적으로 낮은 설계 환기량, 즉 공기 교환량 및 입기 슬롯의 각도 조절에 따른 입기 단면적의 증가 등을 그 원인으로 지적할 수 있다. 이 경우 정성적 및 정량적 결과로부터 0.40m의 입기류 도달거리 값을 도출할 수 있다.

그러나 Fig. 3.4.19의 경우 시뮬레이션 연산이 수행되는 동안 온도 분포 모니터링을 통하여 확보한 정량적 데이터만을 토대로 판단할 경우 외기가 도달했을 것으로 판단되는 지점을 두 군데 정도 후보군을 제시할 수 있으나 이를 실제 유동장 및 온도장 형태와 함께 비교 분석 시, 판단의 오류를 범할 수 있는 가능성을 내포하고 있음을 확인할 수 있다. 즉 폭 방향에 따른 온도 그래프 상에는 온도 하락 구간, 즉 변곡 구간이 두 영역이 발생하고 있는데 반하여, 온도장을 토대로 판단할 때, 이는 입기 슬롯으로부터 유입된 기류가 계군 내로 포물선 형태로 공급되지 않고, Free-jet 조건에 위배된 채, 천장을 행해 뺏어나가다가 반대편 측벽의 입기 슬롯으로부터 유입된 기류와 부딪히면서 바닥으로 떨어져 온도 하락 구간을 형성하기 때문이다. 또한 Zhang 등(1996, 1999)도 그들의 연구를 통하여 열전대 등을 이용한 대상 공간에서의 열환경 모니터링만으로는 정확한 입기류 도달거리를 선정하는데 입기류의 비가시성, 데이터 획득의 불안정성, 연구자 주관의 관여로 신뢰성이 떨어지는 점 등의 한계성을 지적한 바 있으며 이로 인하여 연기 발생기 등을 이용하여 정성적인 형태의 기류를 관측하고자 시도한 바 있다. 따라서 Fig. 3.4.19 등의 사례를 통하여 CFD를 이용한 입기류 도달거리 산정 연구의 장점 및 당위성을 제시할 수 있는 좋은 사

레라고 판단할 수 있다.

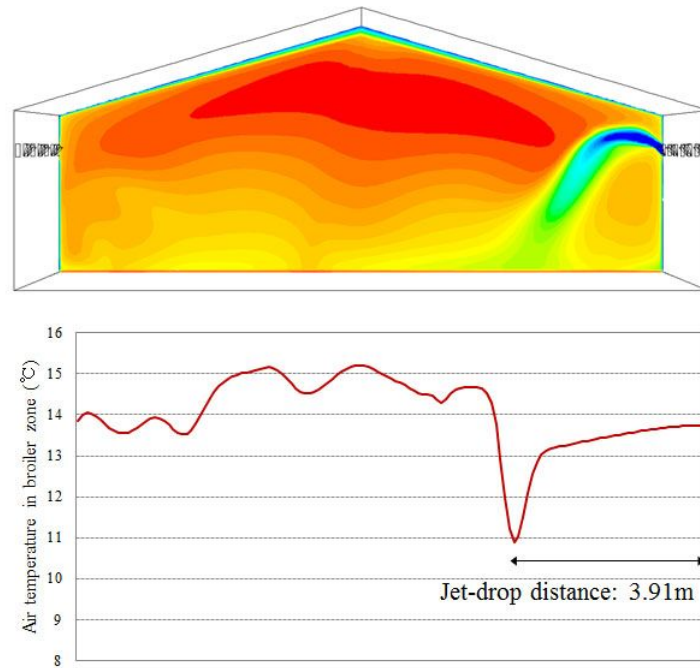


Fig. 3.4.17. 입기 슬롯 45°, 0.150 AER, 외기 온도 -15°C 일 때 입기류 도달거리 결정

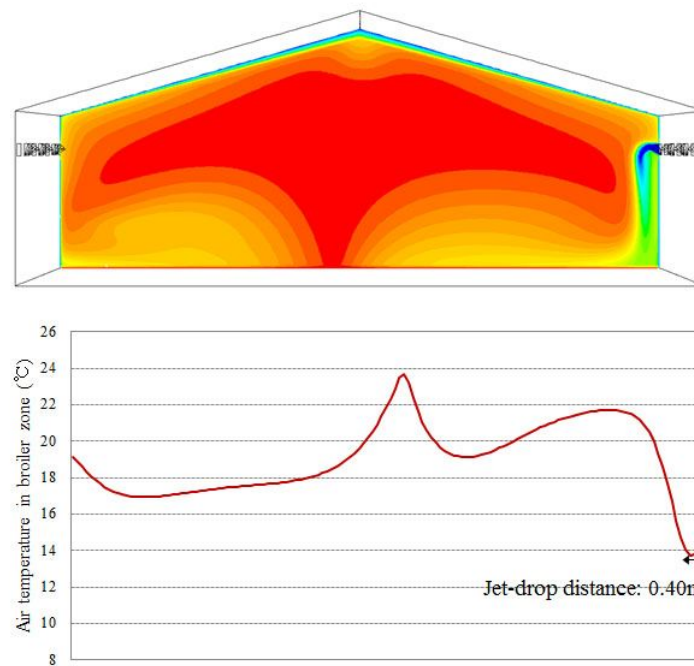


Fig. 3.4.18. 입기 슬롯 60°, 0.05 AER, 외기 온도 -15°C 일 때 입기류 도달거리 결정

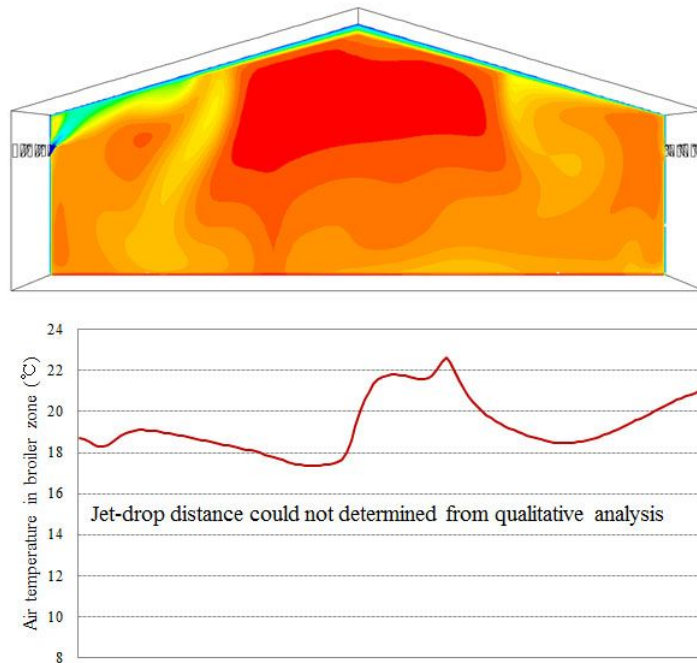


Fig. 3.4.19. 입기 슬롯 30°, 0.200 AER, 외기 온도
- 15°C일 때 입기류 도달거리 결정

입기류 도달거리 및 설계 변수 간의 선형회귀(Linear regression) 분석을 위하여 환경 조건으로 설정한 108가지의 구조 중 대표적인 4개의 입기 슬롯을 대상으로 총 432개의 도달거리 데이터를 추출하였다. 이를 토대로 시뮬레이션 연산을 통하여 확보된 정성적 결과에 기반하여, 설계 조건에 따라 Free-jet 조건에 위배되는 결과를 제외한 후, 폭 방향 별 온도 모니터링 결과를 토대로 입기류 도달거리를 산정하였다. 입기류 도달거리는 폭방향 온도 구배의 변곡점 중 최저 온도 값을 보이는 영역과 정성적 온도장을 토대로 입기 슬롯으로부터 유입된 기류의 포물선 형태를 토대로 산출하였다.

각 환경 조건 별로 아르키메데스 수, 유입구의 높이, 수력학적 지름 등으로 표현되는 유입구의 특성을 반영한 Jet-drop factor 및 전체 형상에 대한 물리적인 정보를 수반하는 수정 아르키메데스 수 등을 계산하였으며 이를 이용하여 Zhang 등 (1999)이 제시한 회귀 모델 A 및 모델 B에 적용하였다.

$$Model A: D_d = -1.3243 + 3.6570F_{jd}^{-\frac{1}{3}} \quad \text{식 (3.4.8.)}$$

먼저, Jet-drop factor를 이용한 회귀 모델 A는 다음 식 (3.4.8)과 같이 표현된다.

단순회귀분석법을 통하여 회귀 계수 즉 C_1 및 C_2 값은 각각 -1.3243, 3.6570으로 나타났으며 이때 표본 자료를 통하여 산출한 결정계수(coefficient of determination, r^2)는 0.7444 수준으로 나타나 해당 모델을 통하여 약 74%가 회귀 방정식에 의하여 설명되고 있다고 판단할 수 있다($P < 0.005$). 즉 Jet drop factor와 입기류 도달거리 간의 상관 관계를 통하여 약 74.4%로 설계 조건에 따른 입기류 도달 거리를 예측할 수 있을 것이라 판단할 수 있다.

자료의 확산 정도를 평가하기 위하여 오차자승합(Error sum of squares, SSE)을 자유도(Degree of freedom)로 나누어준 MSE 값은 0.4094으로 계산되었다. 슬롯 위치에 따른 각각의 회귀 방정식을 구성하는 회귀계수, 결정계수, MSE 값은 Table 3.4.8.과 같다.

각각의 입기 슬롯으로부터의 입기류 도달거리 결과 및 Jet drop factor 와의 상관 계수는 약 0.74~0.85에 분포하는 것으로 나타났다.

Table. 3.4.8. Model A에 대한 전체 및 각 입기 슬롯 별 회귀 계수, 결정계수, MSE

Regression Model A		C_1	C_2	R^2	MSE	
Total		-1.324	3.657	0.744	0.409	$P < 0.005$
Slot location	R3	-1.113	3.595	0.781	0.315	$P < 0.005$
	L4	-1.668	4.225	0.776	0.354	$P < 0.005$
	L6	-1.765	4.114	0.763	0.454	$P < 0.005$
	R7	-2.369	5.109	0.852	0.442	$P < 0.005$

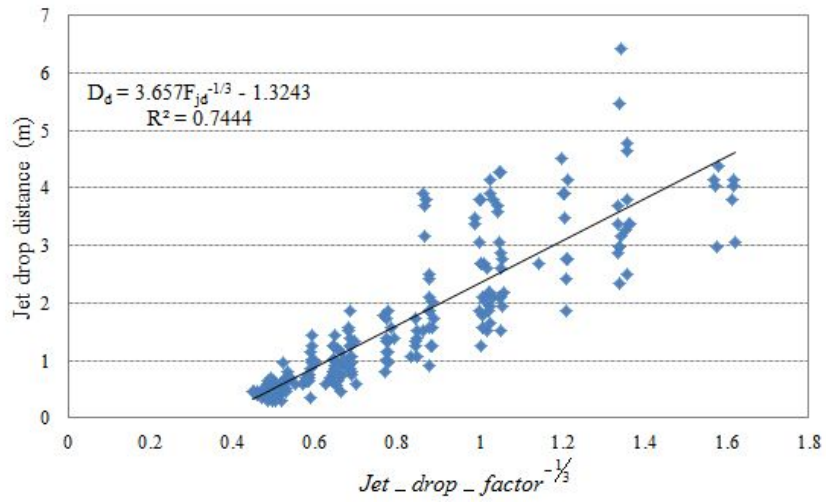


Fig. 3.4.20. Model A에 대한 전체 자료 회귀 분석 결과
(Jet drop factor versus jet drop distance, $R^2=0.7444$)

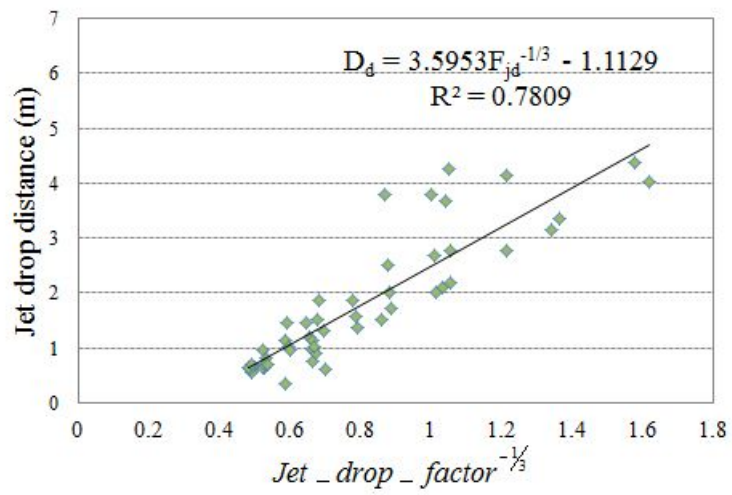


Fig. 3.4.21. 입기 슬롯 R3에서의 선형회귀 분석 결과
(Model A)

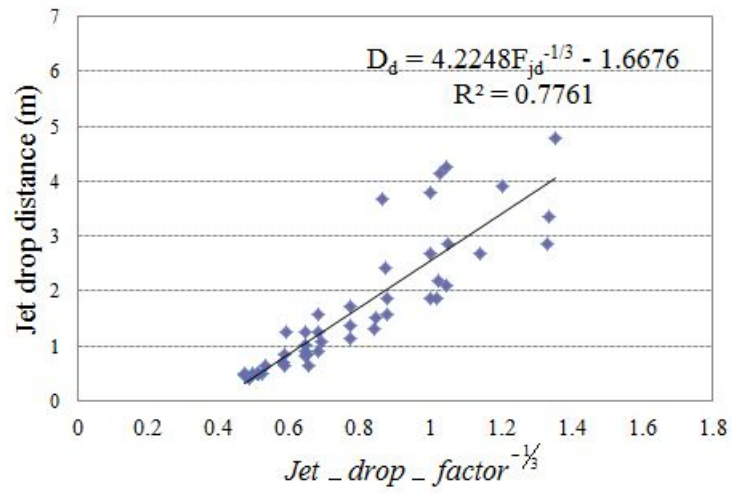


Fig. 3.4.22. 입기 슬롯 L4에서의 선형회귀 분석 결과 (Model A)

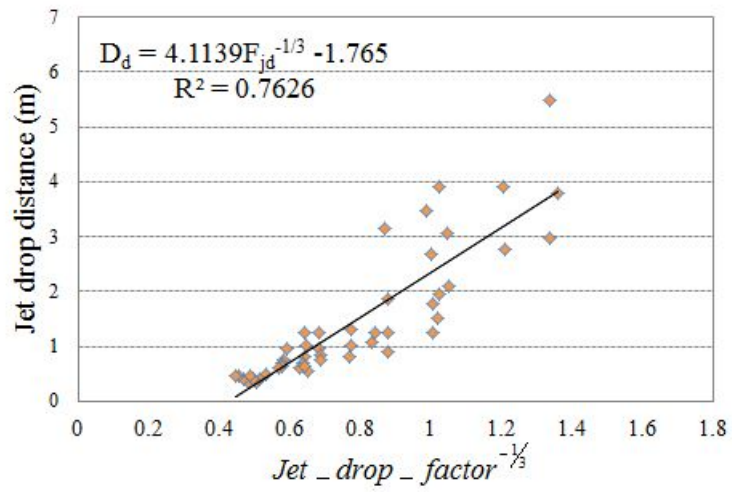


Fig. 3.4.23. 입기 슬롯 L6에서의 선형회귀 분석 결과 (Model A)

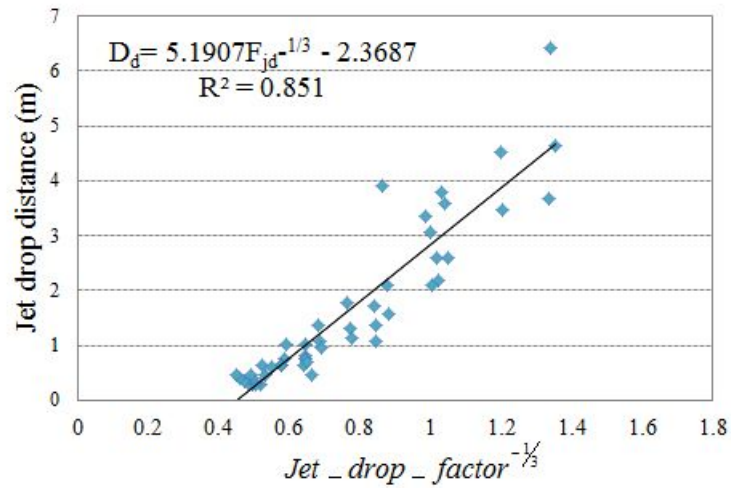


Fig. 3.4.24. 입기 슬롯 R7에서의 선형회귀 분석 결과
(Model A)

$$\text{Model B: } D_d = -1.2922 + 53.23A_{rc}^{-\frac{1}{3}} \quad \text{식 (3.4.9.)}$$

수정 아르키메데스 수를 이용한 회귀 모델 B는 다음 식 (3.4.9)과 같이 표현된다. 모델 B의 회귀 방정식의 계수 즉 C_3 및 C_4 값은 각각 -1.2922, 53.230으로 나타났으며 이때 표본 자료를 통하여 산출한 결정계수는 0.737 수준으로 나타나 해당 모델을 통하여 약 74%가 회귀 방정식에 의하여 설명된다($P < 0.005$). 이는 Jet-drop factor를 이용한 모델 A와 비교하였을 때 약간의 결정계수 값의 하락을 보이는 것으로 나타났다. 이는 Zhang 등(1999)의 연구 결과와 마찬가지로, 두 모델은 서로 매우 근소한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 회귀 방정식의 확산 정도를 평가하기 위한 MSE 값은 0.4220 정도로 계산되었다. 입기 슬롯 위치에 따른 모델 B의 각각의 회귀계수, 결정계수 및 MSE 값은 Table 3.4.9와 같다. 마찬가지로 각 입기 슬롯으로부터의 입기류 도달거리 및 수정아르키메데스간의 결정계수는 각각 0.74~0.84 사이의 값을 얻을 수 있었다.

Table 3.4.9 Model B에 대한 전체 및 각 입기 슬롯 별 회귀 계수, 결정계수, MSE

Regression Model B		C_3	C_4	R^2	MSE	
Total		-1.292	53.230	0.737	0.422	$P < 0.005$
Slot location	R3	-1.082	52.354	0.774	0.325	$P < 0.005$
	L4	-1.625	61.366	0.765	0.368	$P < 0.005$
	L6	-1.739	60.010	0.754	0.465	$P < 0.005$
	R7	-2.337	75.773	0.842	0.458	$P < 0.005$

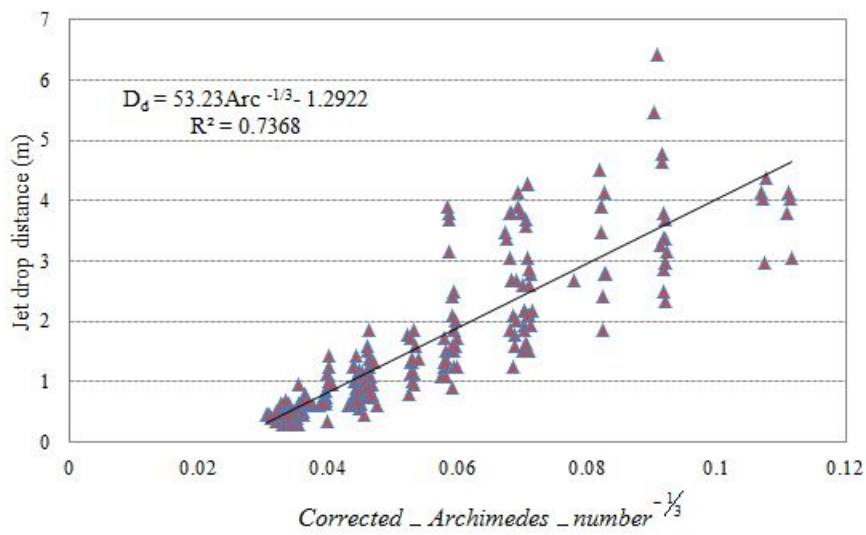


Fig. 3.4.25. Model B에 대한 전체 자료 회귀 분석 결과
(Corrected Archimedes number versus jet drop distance, $R^2=0.7368$)

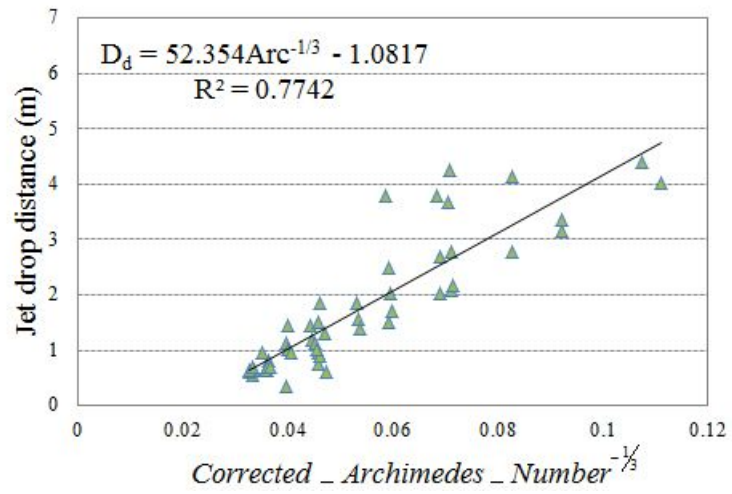


Fig. 3.4.26. 입기 슬롯 R3에서의 선형회귀 분석 결과 (Model B)

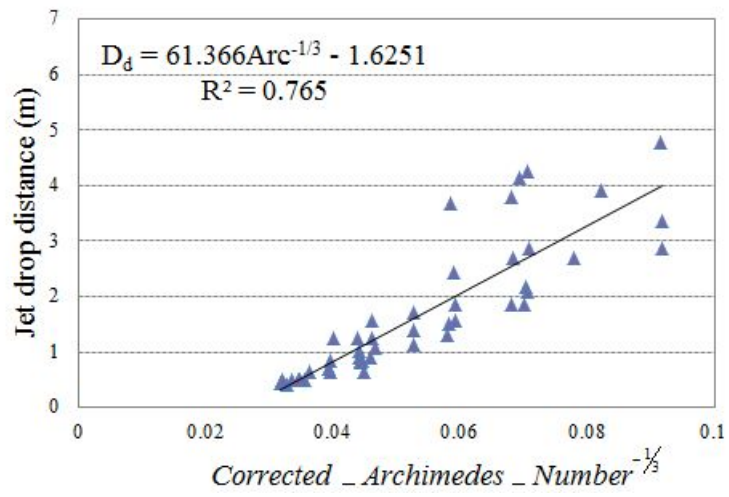


Fig. 3.4.27. 입기 슬롯 L4에서의 선형회귀 분석 결과 (Model B)

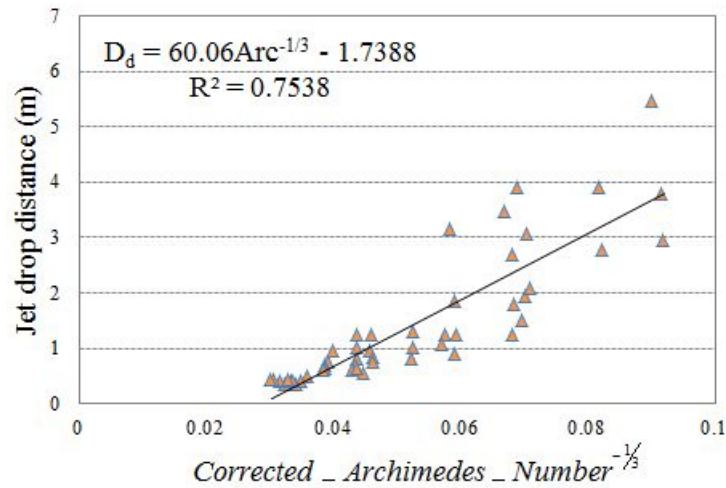


Fig. 3.4.28. 입기 슬롯 L6에서의 선형회귀 분석 결과 (Model B)

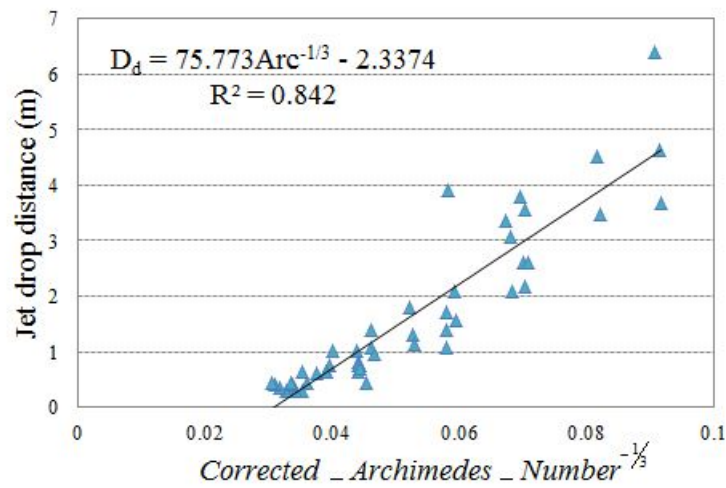


Fig. 3.4.29. 입기 슬롯 R7에서의 선형회귀 분석 결과 (Model B)

CFD 시뮬레이션을 이용하여 각 환경 조건 별로 산출한 입기류 도달거리를 토대로 Zhang 등(1996, 1999)이 제시한 선형 회귀 모델 A, B를 각각 적용해본 결과 두 모델 모두, 선행 연구에서 제시하였던 결정계수 치에 비하여 다소 하락한 수치를 보이는 것으로 나타났다. 이는, 입기 슬롯을 1개, 3개로 실시하였던 선행연구와는 달리 총 14개의 입기 슬롯이 교차로 마주보고 있는 실제 육계사 형태의 환기 구조를 회귀 모델에 적용시킨 것에 따른 자료의 오차 및 변동으로 판단된다. 그러나 정성·정량 분석이 가능하고 폭 방향 온도 실측치만을 통해 입기류 도달거리를 산정

할 때 발생할 수 있는 판단의 오류(Free-jet 조건 위배 시) 등과 같은 다양한 한계점을 시뮬레이션 기법을 이용하여 극복할 수 있었으며 모델 및 이론식의 개량을 통하여 더욱 신뢰성 높은 입기류 도달거리 예측이 가능할 수 있을 것이라 판단된다.

향후 현장 검증 실험 등을 통하여 시뮬레이션 모델 자체의 정확도를 향상시키는 작업이 필요할 것으로 사료되며 Jet drop factor 및 수정 아르키메데스 수 등을 결정하는 각 변수 별 민감도 분석을 통하여 가중치를 산정하고 이를 이용하여 신뢰성이 향상된 예측 이론 및 모델을 개발할 수 있을 것이라 기대된다. 이렇게 개발 및 개량된 Jet drop distance 모델을 토대로 실제 동절기 크로스 환기 방식을 채택하는 시설 내부에 열환경 모니터링을 실시하고 해당 구조에 대한 물리적 특성, 유속, 온도 등을 변수로 본 이론식 등에 대입한다면 입기 슬롯으로부터 동물군에 도달하기까지의 입기류 도달거리를 예측할 수 있고 이를 통하여 적정 열환경 조성 및 적정 환기를 위한 운영 지침을 제시할 수 있을 것이라 기대할 수 있다.

제 5 절 폐열회수 환기장치

1. 육계사용 폐열회수 환기장치의 열교환기 설계를 위한 수치해석

가. 서론

육계사용 폐열회수 환기장치는 일반 건물용에 비해서 다른 특성을 요구받는다. 상대적으로 공간적 크기의 제약은 덜한 반면 혹독한 환경 조건에서 운전될 수 있어야 하고 또 유지관리가 용이하여야 한다(1,2,3). 특히 닭의 활동뿐 아니라糞과 사료 등으로부터 다량의 분진이 발생하고 계사내 습도가 상당히 높게 유지되기 때문에 폐열회수 환기장치의 열교환기에 분진과 결로 문제가 발생할 수 있다(4,5). 또 겨울철 육계사 내부는 상대습도가 60%에서 70%로 습도가 높게 유지되기 때문에 열교환기에서 결로 발생은 불가피하다. 열교환면의 온도가 열교환기에 흐르는 공기의 이슬점 온도 이하가 되면 결로가 맺히게 되고, 열교환면의 온도가 0℃ 이하로 내려가면 결로에서 결빙이 발생하기 시작한다(2,3). 결빙이 성장할수록 열교환기의 유로가 막혀 압력손실이 증가하고, 유량이 감소하여 열교환효율이 감소되며, 심각한 경우 결빙에 의해 유로가 모두 막혀 폐열회수 환기장치를 사용할 수 없게 된다(6,7,8).

따라서 육계사에 사용되는 열교환기는 다량의 분진 및 표면의 열교환면에 결로된 물을 자연적으로 배출할 수 있는 구조로 만들어져야 한다(9,10,11).

열교환기에서 분진이 자연적으로 배출되기 위해서는 배출 공기 유로에 분진이 쌓이는 원인이 되는 돌출 부위가 없고, 가능한 유로 폭이 넓어야 한다. 이것은 열교환기의 체적을 증가시키는 요인이 되지만 필터를 통해 분진을 제거하는 것 보다는 훨씬 경제적이고 합리적인 방법이다.

결로와 결빙문제에 관해서는 계사 내 공기의 상대습도가 60-70%에 이르기 때문에 결로 자체를 원천적으로 방지한다는 것은 불가능하다(4). 따라서 열교환기 내 결로를 발생하도록 두되, 발생된 응축수를 어떻게 용이하게 배출할 수 있도록 할 것인가 하는 문제와 결빙에 의하여 유로가 막히는 것을 어떻게 방지할 것인가에 초점을 맞추어야 한다(13,14).

기본적인 설계개념으로 급기유로와 배기유로는 서로 대항류 형태를 취하도록 하였고 각 유로가 수직방향을 향하도록 하여 결로된 응축수가 중력에 의하여 배출될 수 있도록 하였다. 급배기 덕트를 연결하기 위해서는 급배기 유로의 입출구를 모두 상하단에 둘 수 없기 때문에 급기측 유로는 대항류 형태 그대로 두고, 배기측 유로는 상하단 가까이에서 수평방향으로 꺾어 ㄷ자 형태의 유로를 갖도록 설계하였다.

본 연구에서는 열교환기 내 결로 발생에 따른 열교환효율 변화에 대한 연구를 수행하기 위해 결로해석모델을 도입하여 풍량, 외기온도 및 실내 상대습도를 변수로 하여 열교환효율 변화를 전산유체해석을 통해 분석하였다.

결로해석모델 검증은 위해 실험장치를 구성하고 이를 실험적으로 검증하였다. 우

선 결로가 발생하지 않는 조건에서 고온측 및 저온측에서 열평형을 비교하여, 열교환기에서 외부로 누설의 유·무 및 단열의 적정성을 판단하였다. 결로 발생에 따른 열교환효율을 산정하기위해 풍량을 변화시키며 열교환효율을 측정하였다. 외기온도가 낮을수록, 실내상대습도가 높을수록 열교환기내 결로량 및 결로발생면적이 증가하여 열교환효율이 증가한다. 따라서 외기온도 및 상대습도 변화에 따른 열교환효율 증가에 대한 실험을 수행하였다. 또한 실험을 통해 측정된 물의 양과 수치해석으로부터 계산된 물의 양을 비교하였다. 모든 실험결과는 결로해석을 적용한 전산유체해석과 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다.

나. 폐열회수장치 사양

본 연구의 해석대상인 열교환기의 형상을 Fig. 3.5.1에 나타내었다. 열교환기는 외기(Outside air, OA)가 실내로 급기(Supply air, SA)되는 급기측 유로와 실내공기(Room air, RA)가 바깥으로 배기(Exhaust air, EA)되는 배기측 유로로 나누어져 있다. 그림에 나타난 바와 같이 배기측 유로는 C형으로, 하나의 단일공간으로 되어 있어 결로가 맺히더라도 수직방향으로 흘러내리도록 하였다. 급기측 유로는 수직상방향으로 다수의 긴 사각채널로 구성되어 있다. 열교환기의 총 길이는 1000mm, 폭 350mm이고, 급기 및 배기측 유로 폭은 각각 4mm이다. 급기측의 긴 사각채널 단면의 피치는 4.5mm이며, 배기측 입·출구 길이는 160mm이다. 열교환기는 두께가 0.25mm인 폴리프로필렌으로 각 부분의 형상의 크기 및 해석에 사용한 물성을 각각 Table. 3.5.1, 3.5.2에 나타내었다.

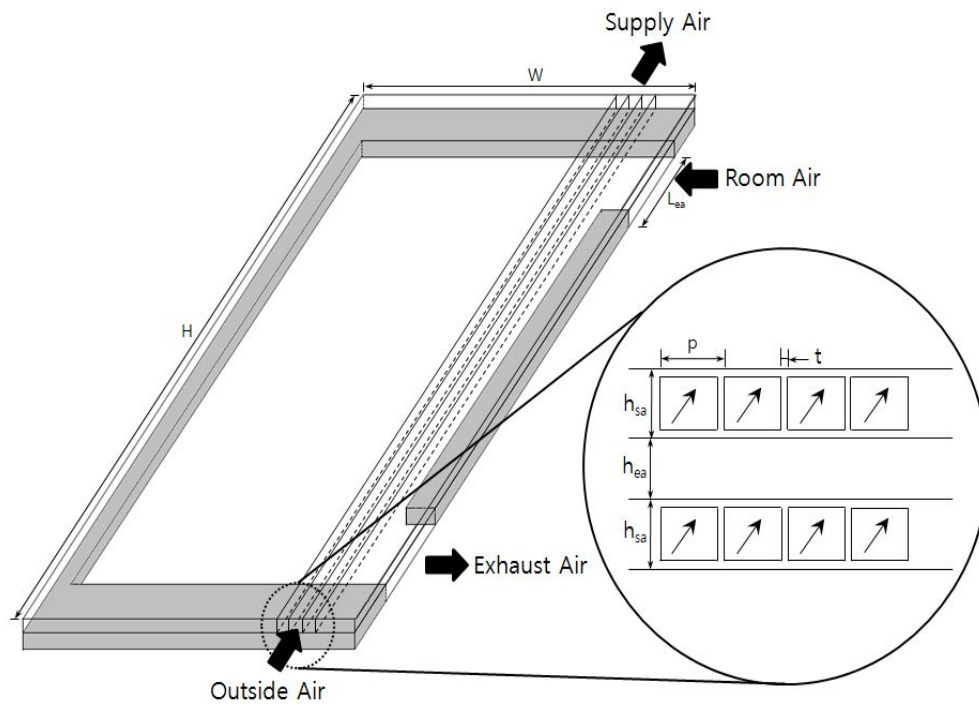


Fig. 3.5.1 Schematic diagram of heat exchanger element

Table. 3.5.1 Specifications of heat exchanger element

Parameters	Meaning	Size(mm)
H	Height of heat exchanger element	1000
W	Width of heat exchanger element	350
L_{ea}	Length of EA entrance	160
h_{sa}	Gap width of SA channel	4
h_{ea}	Gap width of EA channel	4
p	Pitch	4.5
t	Thickness	0.25

Table. 3.5.2 공기 및 polypropylene의 물성값

Property	Air	Polypropylene
Density [kg/m ³]	1.225	1170
Specific heat [J/kg · K]	1006.4, C _p (T)	1930
Thermal conductivity [W/m · K]	0.0242	0.17
Viscosity [kg/m · s]	1.7894×10 ⁻⁵	-

다. 수치해석연구

(1) 열교환기내 결로 및 결빙현상

열교환면의 온도가 열교환기에 흐르는 공기의 이슬점 온도 이하가 되면 열교환면에 결로가 발생한다. 1 kg의 수분이 응축하면 약 2440 kJ의 잠열이 발생한다. 따라서 열교환기내에 결로가 발생하면 잠열에 의해 열교환효율이 증가하는 이점이 있다. 특히, 현열열교환기의 경우 열교환면을 통한 습도교환은 없으므로, 상변화에 따른 잠열에 의해 EA측 공기의 온도가 상승하고, 이에 따라 열교환면을 통한 열전달량이 증가하여 SA측 공기의 온도도 상승한다.

열교환면의 온도가 0 °C 이하가 되면 결로에서 결빙이 발생하기 시작한다. 열교환기에 결빙이 발생하기 시작하면 유로가 막혀 압력손실이 증가하고, 유량이 감소하여 열교환효율이 감소한다. 이는 결빙면적 증가를 더욱 촉진시키며 제상이 수행되지 않을 경우 육계사내 높은 습도로 인해 결빙이 발생하고, 유로가 완전히 막혀 폐열회수 환기장치의 사용이 불가능한 경우가 발생할 수 있다. 열교환기내 결로 및 결빙 위치 및 발생량은 풍량, 입구 온·습도, 열교환기 코어의 온도, 열교환효율, 열교환기의 구조, 열전달계수 등 다양한 변수에 영향을 받으며, 각 변수는 서로 영향을 미친다. 따라서 열교환기내 결로 및 결빙 현상에 대한 전산유체해석은 열 및 물질전달에 대한 많은 가정이 필요하며, 상변화 과정에 대한 모사가 난해하기 때문에 거의 불가능하다. 따라서 본 연구를 통해 열교환기 내 결로 발생에 의한 열교환효율 변화에 대해 고찰하고자 한다.

(2) 결로해석모델

열교환면의 온도가 열교환기에 흐르는 공기의 이슬점 온도 이하가 되면 열교환면에서 결로가 발생한다. 따라서 외기온도가 낮아지면 열교환면의 온도가 공기의 이슬점온도 이하가 되어, 열교환기에서 결로가 발생한다. 결로 발생 시 상변화에 따른 잠열에 의해 열전달량이 증가하여 열교환기의 효율이 증가하므로, 이를 정확히 예측하는 것은 중요하다.

결로해석을 위한 가정은 다음과 같다.

- (1) 결로는 RA→EA 유로에서만 발생하며, OA→SA 유로에는 결로가 발생하지 않는다.
- (2) 발생한 결로에서 증발에 의한 효과는 무시한다.
- (3) 발생한 결로는 유동에 영향을 미치지 않는다.
- (4) 결로가 발생한 이후의 셀에서는 상대습도가 100%이다.

Fig. 3.5.2는 결로해석을 위한 모델을 나타낸 것으로, 검사체적에 대해 결로량은 검사체적 입·출구 절대습도차와 공기의 유량의 곱으로 나타낼 수 있으며, 에너지 보존방정식은 검사체적 입·출구 열량차이는 결로된 물의 열량과 열전달면을 통해 전달된 열량의 합과 같음으로부터 나타낼 수 있다. 따라서 검사체적에서 응축량 및 에너지보존방정식은 다음과 같다.

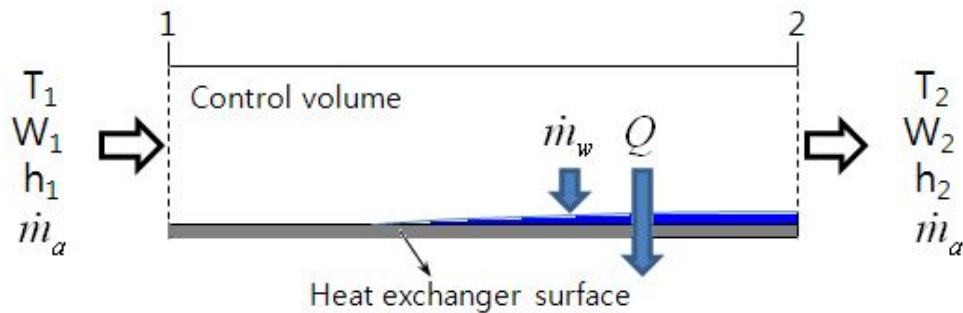


Fig. 3.5.2 Schematic diagram of condensation analysis model

Condensation flow rate:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (W_1 - W_2) \quad (1)$$

Energy conservation:

$$\dot{m}_a h_1 - \dot{m}_w h_f - Q = \dot{m}_a h_2 \quad (2)$$

여기서, \dot{m}_w , \dot{m}_a 는 각각 물과 공기의 유량이며, W 는 절대습도, h 는 엔탈피, h_f 는 액체상태의 엔탈피를 나타낸다. 두 식으로부터 \dot{m}_w 를 소거하면,

$$\dot{m}_a h_1 - \dot{m}_a (W_1 - W_2) h_f - Q = \dot{m}_a h_2 \quad (3)$$

양변을 \dot{m}_a 로 나눈 후 정리하면,

$$\frac{Q}{\dot{m}_a} = (h_1 - h_2) - (W_1 - W_2)h_f \quad (4)$$

와 같다.

건공기와 수증기의 엔탈피는 각각,

$$h_a = C_{pa}T \quad (5)$$

$$h_w = C_{pw}T + h_{g0} \quad (6)$$

이고, 여기서 C_{pa} , C_{pw} 는 각각 건공기와 수증기의 비열, h_{g0} 는 0°C에서 포화수증기의 엔탈피이다. 대기중의 공기는 일정량의 수증기를 포함하고 있으므로, 습공기 혼합물의 엔탈피는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h &= h_a + Wh_w = C_{pa}T + W(h_{g0} + C_{pw}T) \\ &= (C_{pa} + WC_{pw})T + Wh_{g0} \\ &= C_pT + Wh_{g0} \end{aligned} \quad (7)$$

따라서, 위 식을 앞서 유도한 식(4)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{Q}{\dot{m}_a} &= (C_pT_1 + W_1h_{g0}) - (W_1 - W_2)h_f - (C_pT_2 + W_2h_{g0}) \\ &= C_p(T_1 - T_2) + h_{g0}(W_1 - W_2) - (W_1 - W_2)h_f \\ &= C_p(T_1 - T_2) + (h_{g0} - h_f)(W_1 - W_2) \end{aligned} \quad (8)$$

(3) 가상비열의 정의

상변화에 따른 열전달률 증가량을 계산하기 위해, 앞서 유도한 식(8)로부터 다음과 같이 상변화에 따른 잠열을 포함한 가상비열을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{Q}{m_a} &= C_p(T_1 - T_2) + (h_{g0} - h_f)(W_1 - W_2) \\ &= \tilde{C}_p(T_1 - T_2)\end{aligned}\quad (9)$$

단,

$$\tilde{C}_p = C_p + \frac{(W_1 - W_2)}{(T_1 - T_2)}(h_{g0} - h_f) \quad (10)$$

Fig. 3.5.3은 습공기선도에서 결로가 발생할 경우 열교환 과정을 나타낸 것이다. 결로가 발생하지 않으면 온도변화만 나타나지만 열교환면의 온도가 공기의 이슬점 온도 이하가 되어 결로가 발생하면, 1→2를 따라 온도뿐 아니라 절대습도도 감소하게 된다. 여기서, $(W_1 - W_2)/(T_1 - T_2)$ 는 포화곡선의 기울기를 의미하며 매우 작은 미소구간에 대해서는 접선의 기울기를 의미한다. 따라서 앞에서 유도한 식은 결과적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{C}_p = (C_{pa} + W_s(T)C_{pw}) + \frac{dW_s(T)}{dT}(h_{g0} - h_f) \quad (11)$$

여기서, $C_{pa} = 1006.4 \text{ J/kgK}$, $C_{pw} = 1860 \text{ J/kgK}$, $h_{g0} = 2501 \text{ kJ/kgK}$ 이다. 결로가 발생한 후 상대습도가 일정하게 유지된다고 가정하면 W_s , dW_s/dT 는 온도의 함수가 되므로 $W_s = W_s(T)$, $dW_s/dT = dW_s(T)/dT$ 로 표현할 수 있고, $h_f = 4.18 \cdot (T - 273.15)$ 로 나타낼 수 있으므로, 가상비열 \tilde{C}_p 는 온도에 대한 함수가 된다.

따라서 결로에 의한 열전달을 해석하기 위해 각 셀에서의 온도가 공기의 이슬점보다 낮으면, 공기의 비열 C_p 를 위 식에 표현된 잠열을 포함한 가상 비열 \tilde{C}_p 을 적용하여 에너지방정식을 계산한다.

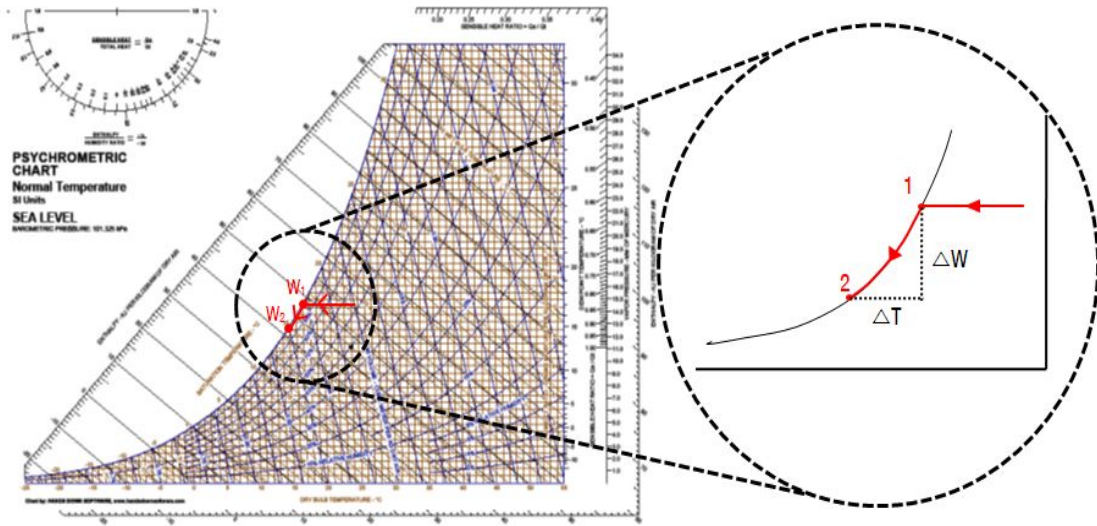


Fig. 3.5.3 Heat transfer process when condensation occurs

(4) 수치해석- 지배방정식

본 연구의 해석대상이 되는 열교환기는 3차원 정상상태로 계산하였으며, 유동은 비압축성이라고 가정하였다. 열교환기내 유동 및 열 해석을 수행하기 위해 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식을 사용하였다.

검사체적에서 질량의 시간변화율은 검사체적에서 질량의 정미유출율과 정미증가율의 변화량과 같으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (12)$$

본 연구에서는 정상상태, 비압축성 유동으로 가정하여 해석하였으므로 정상상태에서 질량의 시간변화율은 0 이다. 결과적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (13)$$

해석에 사용한 풍량은 5~15 CMH로 최대 풍량인 15 CMH일 때 Re 수는 급기측 유로에서 1020, 배기측 유로에서 1880으로 양측 유로 모두 난류로의 천이조건 이하이므로, 층류유동으로 해석하였다. 따라서 검사체적에서 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (14)$$

정상상태에서 시간에 따른 변화율은 0이므로 결과적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (15)$$

검사체적에서 내부에너지의 정미증가율은 대류에 의한 정미유출량과 확산에 의한 정미유출입과 같으므로, 에너지보존식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{Pr} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right] \quad (16)$$

정상상태에서 시간에 따른 변화율은 0이고, $Pr = \frac{C_p \mu}{k}$ 이므로, 결과적으로 위 식 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho C_p \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j T) = k \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (17)$$

(5) 경계조건 및 수렴판정

격자계는 Hex 격자를 사용하여 구성하였다. 경계면 근처에서는 종속변수의 구배가 크기 때문에 계산의 정확도를 높이기 위해 Growth factor가 1.1인 비등간격자를 사용하였다. 격자계를 구성함에 있어서 조밀하게 설정할수록 정확한 결과를 얻을 수 있으나 계산비용을 고려하여 적당한 크기의 격자계를 구성하는 것이 필요하다. 다만 격자계에 따라서 원하는 오차범위내의 결과를 도출하는 것이 필요하다. 따라서, 벽면과 벽면에서 첫 번째 격자간의 거리의 적절성을 파악하기 위해 급기축, 배기축 사이를 각각 5점, 10점, 15점으로 격자를 구성하고 결과를 비교하였다. 격자를 5점으로 구성한 결과와 10점으로 구성한 결과 온도 차이는 0.9℃ (2.20%)로 다소 오차가 크게 나타났으며, 10점으로 구성한 결과와 15점으로 구성한 결과의 온도 차이는 0.1℃ (0.24%)로 10점으로 격자를 구성할 경우 약간의 오차를 포함하지만 격자를 5점으로 구성한 경우에 비해 정확한 결과를 얻을 수 있다. 수치해석 시 정확한 계산을 위해 급기축 및 배기축 격자를 각각 15점으로 구성하여 계산하였고, 이때 경계면과 첫 번째 격자 사이의 거리는 약 0.055 mm이고, 계산에 사용된 총 격자수는 1,536,000개이다.

해석에 사용된 경계조건을 Fig. 3.5.4에 나타내었다. 과도한 계산 시간을 줄이기 위해 급기측과 배기측 중심 단면을 기준으로 유동이 완전한 대칭형태를 이룬다고 가정하여, 대칭경계조건(Symmetric Boundary Condition)으로 해석을 수행하였다. 실험에서 송풍기는 각각 EA, SA에 위치하여 열교환기는 음압(Negative Pressure) 상태이다. 전산유체해석 시 이와 동일한 조건을 형성하기 위해 입구 경계조건은 압력이 0 Pa인 압력 경계조건으로 설정하였으며, 출구 경계조건은 경계면에서 계산영역 바깥 방향으로 일정속도로 배기되도록 설정하였다. 이 때, 풍속은 풍량 5~15 CMH를 각각 입구 단면적으로 나누어 계산하였다. 열교환면 이외의 외벽은 주위와 열교환이 발생하지 않는다고 가정하여 단열상태로 가정하여 해석하였고, 열교환이 이루어지는 경계면은 Coupled 경계조건을 사용하여 열교환해석을 수행하였다.

연속방정식과 운동량방정식으로부터 압력장을 계산하기 위해 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 선택하였다. 수송방정식을 이산화 할 때 대류항과 확산항을 함께 취급하기 위해 도식을 사용하였으며 계산의 정확도를 높이기 위해 2차 정확도를 갖는 2차 상류차분도식(Second Order Upwind-difference Scheme)을 사용하였다. 수렴 여부를 판단하기 위해 반복 계산 시 온도, 속도 등 종속변수의 상대오차가 10^{-4} 이하이면 수렴하였다고 판단하였다.

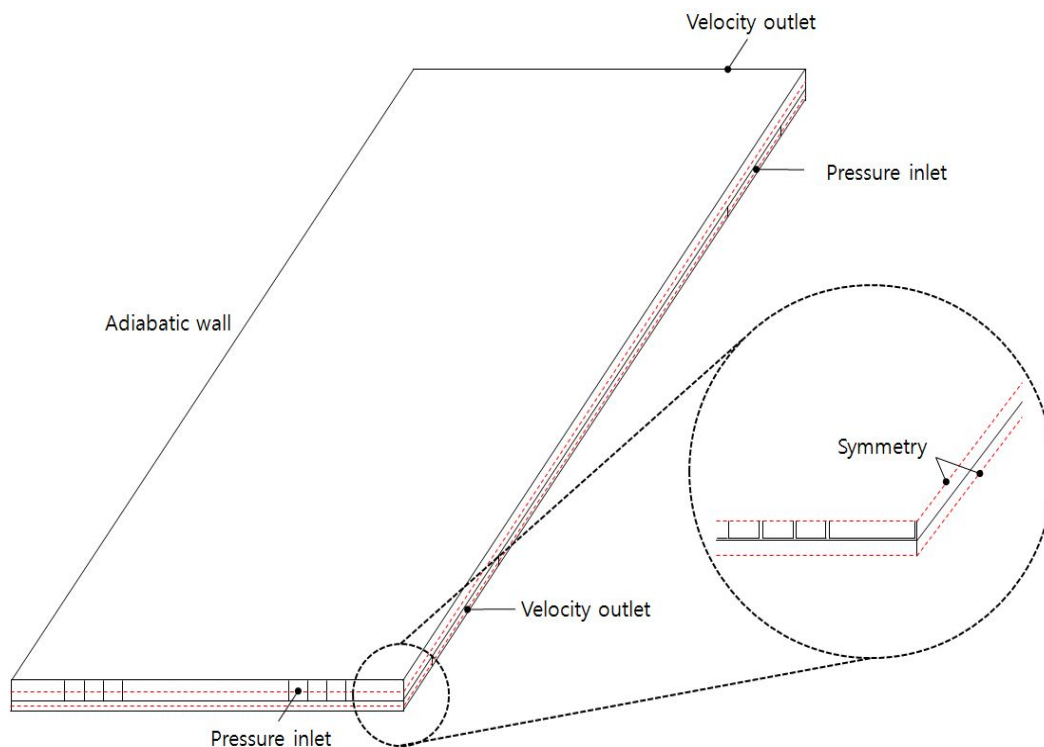


Fig. 3.5.4 Boundary conditions of heat exchanger element

라. 실험연구

(1) 실험장치

본 연구에 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 3.5.5에, 각 부분의 사진의 Fig. 3.5.6 ~ Fig. 3.5.9에 나타내었다. 실험장치는 크게 실험대상인 열교환기, 유동을 형성하기 위한 송풍기, 열교환기 입구로 들어가는 공기의 온·습도 조건을 형성하기 위한 향온향습챔버로 구성된다.

열교환기는 Fig. 3.5.10에 나타난 바와 같이 두께 15 mm인 아크릴로 열교환기 크기의 틀을 구성한 후, 각 경계에 볼트를 체결하여 고정하였다. 볼트로 체결된 아크릴 사이에서 공기가 누기되는 것을 방지하기 위해 두께가 2 mm인 라텍스 고무를 부착하여 열교환기 밖으로 공기가 누기되는 것을 방지하였다. 아크릴 프레임과 덕트를 연결하기 위해 사각-원 레듀서를 사용하였다.

풍량은 직경비가 0.6인 노즐을 사용하여, 노즐 양단의 압력차를 통해 계산하였으며, 송풍기의 발열이 실험결과에 영향을 미치는 것을 배제하기 위해 열교환기의 SA, EA 쪽에 송풍기를 Suction 방식으로 설치하였다. 노즐 양단의 압력차를 측정하기 위해 차압계(Pressure transducer, KIMO)를 사용하였다.

RA→EA 유로의 온·습도를 유지하는 향온향습챔버의 설정 가능 온도는 16~35 °C, 습도는 20~90 %RH 이고, 내부 송풍기와 덕트를 통해 공기를 지속적으로 순환시키며 온·습도를 일정하게 유지시킨다. OA→SA 유로의 온·습도를 유지하는 향온향습챔버는 2m × 2m × 2m 크기의 공간에 온·습도를 제어하며, 설정 가능 온도는 -15.6~80 °C, 습도는 20~80 %RH이다.

온도는 T형 열전대를 사용하여 측정하였으며 RA, EA에서 습도를 측정하기 위해 정전용량식 습도계(Humidity sensor, KIMO)를 사용하였다. 또한 측정된 온도와 습도를 기록하기 위해 데이터 취득 시스템(Data acquisition system, Agilent)을 사용하였다. 데이터 취득 시스템은 20개의 전압측정 채널과 추가로 2개의 전류측정 채널을 사용할 수 있다. 열교환면의 온도분포를 측정하기 위해 열교환면에 TLC 필름을 부착하였다. 부착된 TLC 필름은 15 °C 이하에서 검은색, 15~16 °C에서 붉은색, 16~20 °C에서 초록색, 20~35 °C에서 파란색, 그 이상에서는 다시 검은색을 나타내며 이를 이용하여 단면의 온도분포 및 유동형태를 알 수 있다. TLC 필름의 두께는 175 μm 이고, 열전도도는 0.2~0.4 W/m·K, 비열은 1600~1800 J/kg·K 이다. 열교환기의 외벽에서 열손실을 최대한 줄이기 위해 열전도율이 0.036 W/m·K, 두께가 20 mm인 아이소핑크 보드를 사용하여 단열하였으며, PVC파이프에서 열손실을 최대한 줄이기 위해 열전도율이 0.043 W/m·K, 두께가 20 mm인 덕트 보온재를 사용하여 단열하였다. 또, 열교환기내의 온습도 변화를 측정하기 위한 위치를 Fig.3.5.11에 나타내었다.

실험에 사용된 측정장치의 측정범위, 정확도 등 상세한 설명을 Table. 3.5.3에 자세히 나타내었다.

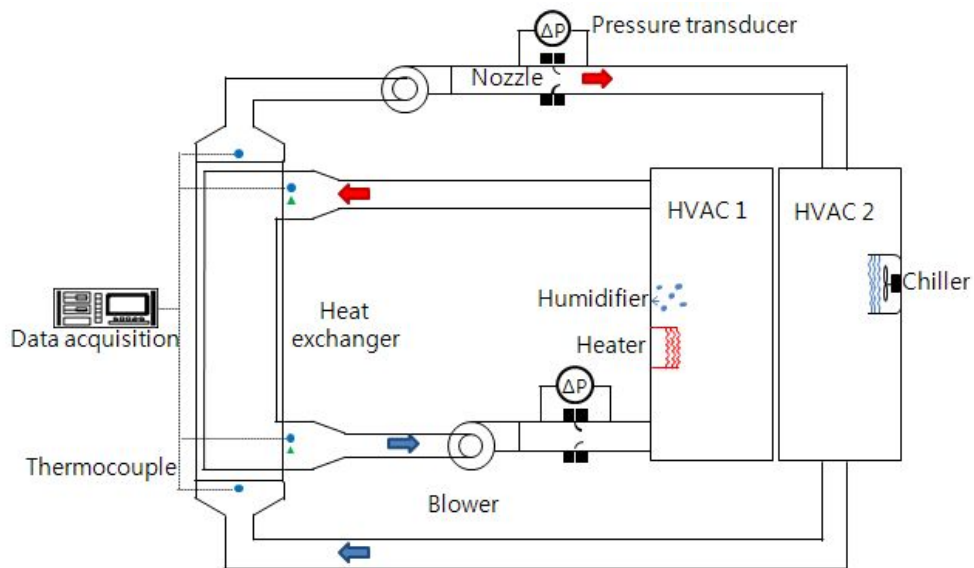


Fig. 3.5.5 Schematic diagram of an experimental apparatus



Fig. 3.5.6 Front view of an experimental setup



Fig. 3.5.7 OA to SA flow path connection



Fig. 3.5.8 RA to EA flow path connection



Fig. 3.5.9 Drainway of heat exchanger element

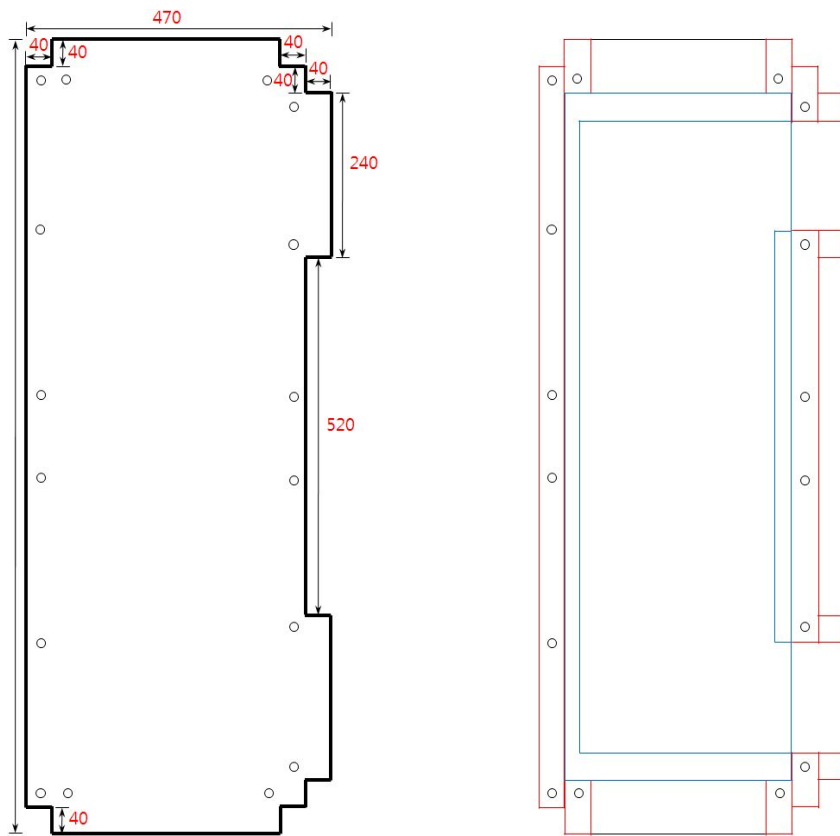


Fig. 3.5.10 Acrylic frame for fixing the heat exchanger element

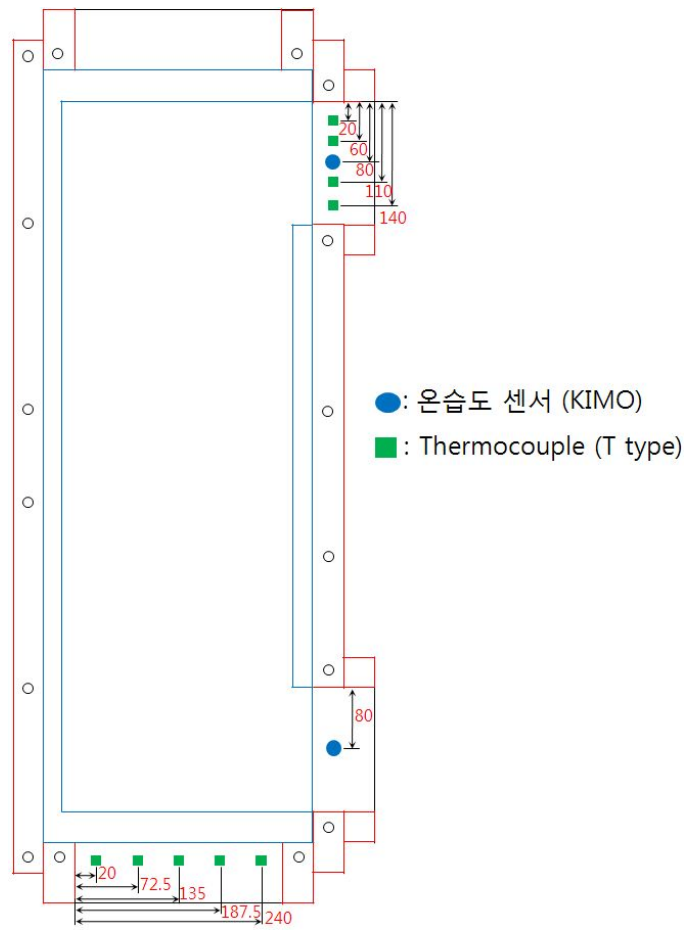


Fig. 3.5.11 온습도 측정 위치

Table. 3.5.3 Specifications of the measurement instruments

HVAC 1 (Low temperature part)	Size	2 m×2 m×2 m
	Temperature range	-15.6~80 °C
	Humidity range	20~80 %RH
HVAC 2 (High temperature part)	Type	Duct
	Temperature range	16~35 °C
	Humidity range	20~90 %RH
Pressure transmitter (KIMO, CP300)	Range	-1000~1000 Pa
	Accuracy	0.5% of reading ±1 Pa
	Response time	0.3 s
Humidity sensor (KIMO, TH300)	Range	0~100 %RH
	Accuracy	1.5 %RH
	Response time	< 10 s
Thermocouple (Omega, T-type)	Thickness	AWG 26
	Range	-200~350 °C
	Accuracy	±0.2 °C
Date aquisition system (Agilent, 34972A)	Current range	~1 A
	Accuracy	0.015% of reading
	Channels	20 Thermocouple ch + 2 Current ch
TLC coated polyester sheet (Hallcrest, TLC film)	Range	~15 °C (Black)
		15~16 °C (Red)
		16~20 °C (Green)
		20~35 °C (blue)
	Accuracy	35 °C~ (Black)
		±0.2 °C
		Thermal conductivity
Specific heat	1.6~1.8 kJ/kg · K	
Thickness	175 μm	
Nozzle (KS, ISA1932)	Diameter ratio	0.6

(2) 측정 장비 및 측정 방법

(가) 온도측정

RA, OA 온도는 T형 열전대를 사용하여 측정하였으며, 각각 열교환기 입구에서 20 mm 만큼 위치한 곳에서 5점을 측정하여 산술평균값을 사용하였다. SA, EA 공기의 온도측정은 유동이 불안정하여 충분히 혼합된 위치에서 측정하고자 열교환기를 통과한 후 파이프를 700 mm 이동한 지점에서 측정하였다. 측정은 T형 열전대를 사용하였으며, 3점을 측정하여 산술평균값을 사용하였다. 파이프는 두께가 3.1 mm인 PVC 파이프를, 공기가 이동하는 동안 열손실을 최소한으로 줄이기 위해 두께가 20 mm인 단열재를 부착하였다.

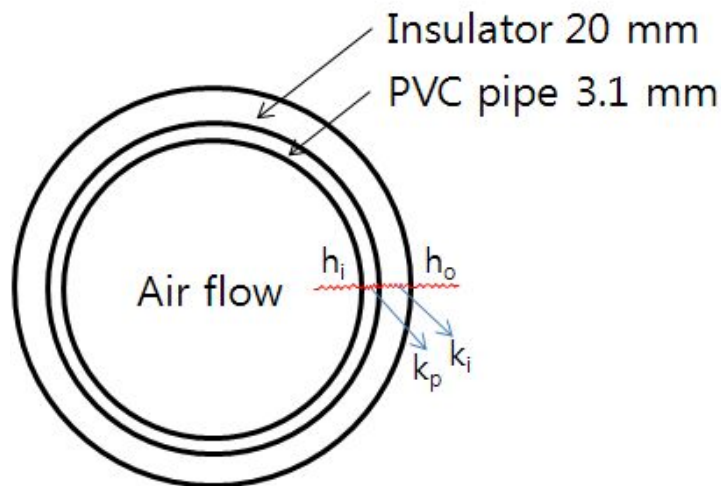


Fig. 3.5.12 덕트 단면도

Fig. 3.5.12에서 유량이 100 CMH일 때 직경이 100 mm인 파이프를 통과하는 공기의 평균속도는,

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{100/3600}{\frac{\pi}{4} \cdot 0.1^2} = 3.54 \text{ m/s} \quad (18)$$

따라서 PVC 파이프에서 Re 수는 다음과 같다. (T=20 °C)

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{3.54 \cdot 0.1}{15.66 \times 10^{-6}} = 22600 \quad (19)$$

파이프 안의 유동을 완전발달유동으로 가정하면, 마찰계수는 Petukhov의 관계식

으로부터,

$$f = (0.791 \cdot Re_D - 1.64)^{-2} = 0.0254 \quad (20)$$

따라서 관 내부에서 Nu 값은 다음과 같이 Gnielinski의 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Nu_D &= \frac{(f/8)(Re_D - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \\ &= \frac{(0.0254/8)(22600 - 1000) \times 0.69}{1 + 12.7(0.0254/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} = 56.1 \end{aligned} \quad (21)$$

관 내부에서 열전달계수는 관계식으로부터,

$$h_i = \frac{Nu_D \cdot k}{D} = 15 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (22)$$

따라서 총 열저항은 관내부 열저항, PVC 파이프에서 열저항, 단열에서 열저항, 외부에서 열저항의 합으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{h_i} + \frac{L_{pvc}}{k_{pvc}} + \frac{L_{insulator}}{k_{insulator}} + \frac{1}{h_o} = \frac{1}{15} + \frac{0.0031}{0.45} + \frac{0.02}{0.026} + \frac{1}{5} \\ &= 1.043 \text{ K/W} \end{aligned} \quad (23)$$

PVC 파이프를 지나면서 발생한 열손실은 PVC 파이프 안과 밖의 열손실과 같으므로, 파이프를 지나면서 발생한 온도강하는 다음과 같다.

$$\rho Q C_p \Delta T = UA(T_{in} - T_{out}) \quad (24)$$

$$\Delta T = \frac{UA(T_{in} - T_{out})}{\rho Q C_p} = \frac{0.959 \times (\pi \cdot 0.123 \cdot 0.7) \times 5}{1.177 \times (100/3600) \times 1006} = 0.04 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (25)$$

관내외부 온도차를 5°C로 가정했을 때, 관 내부를 통과하면서 외부 열손실에 의한 온도강하는 약 0.04 °C로 추정되므로 실제 측정값에 비해 충분히 작아서 무시하였다.

(나) 습도측정

습도계는 KIMO사의 TH300 Humidity/Temperature transmitter를 사용하였으며 (Fig. 3.5.13), 길이 2 m인 폴리카보네이트 재질의 Remote probe를 사용하였다. 습도계는 정전용량식으로, 측정범위는 0~100 %RH 이고, 정확도는 3~98 %RH, 15~25 ℃ 사이의 범위에서 1.5 %RH 이다. 또한 10~80 %RH, $V_{air}=2$ m/s 사이의 범위에서 응답속도는 10초 이하이다. 센서는 각각 RA, EA 입구에서 20 mm 위치한 지점에서 측정하였다.

습도계의 보정은 SATO사의 SK-DPH-2D 광학식 노점계(Optical dew -point hygrometer)를 사용하였으며(Fig. 3.5.14), Fig. 3.5.15에 보정곡선을 나타내었다. 보정은 항온항습챔버내에서 수행되었으며, 실험조건인 28.0 ℃에서 30~90 %RH까지 10 %RH 간격으로 측정하였다.



Fig. 3.5.13 Relative humidity sensor



Fig. 3.5.14 Optical dew-point hygrometer

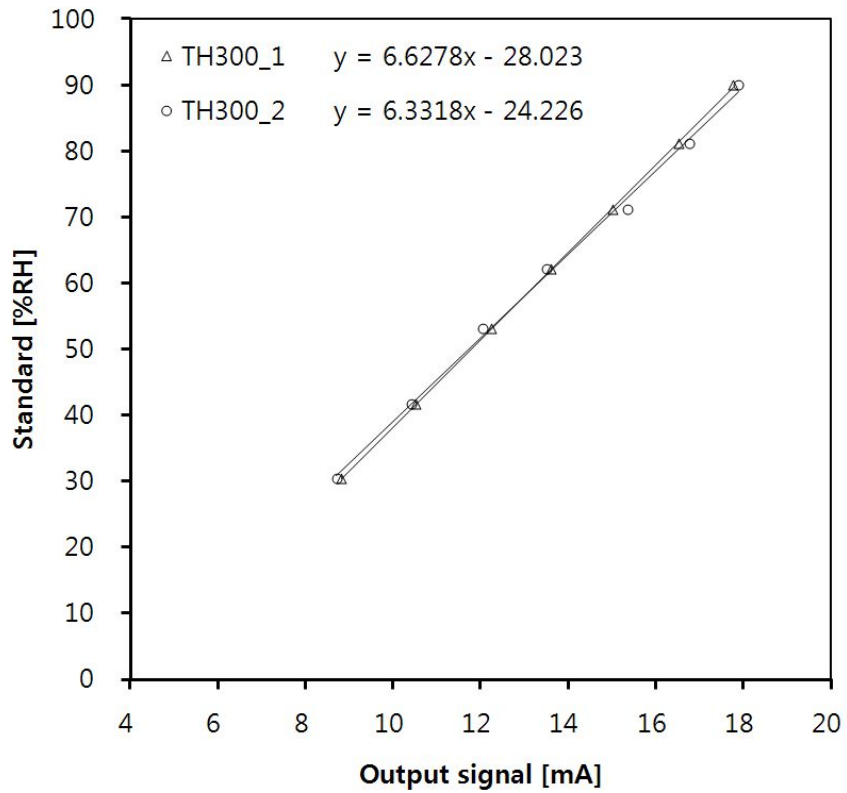


Fig. 3.5.15 Calibration curve of relative humidity sensor

(다) 풍량측정

풍량은 EA, SA측 덕트에서 노즐을 이용하여 노즐 양단의 압력차를 통해 측정하였다. 풍량측정에 사용한 노즐은 KS 규격 ISA1932이고, 직경비가 0.6인 노즐을 사용하였다. 노즐 양단의 압력차를 측정하기 위해 Fig. 3.5.16에서 나타낸 KIMO사의 CP300 Pressure transmitter를 사용하였으며, 차압계의 측정범위는 $-1000\sim 1000$ Pa 이고, 정확도는 측정치의 0.5%이다.

차압계의 보정을 위해 Fig. 3.5.17에 나타난 바와 같이 Dwyer사의 경사마노미터를 사용하였으며, 실험에 사용된 풍량범위인 $10\sim 150$ Pa에 대해 20 Pa 간격으로 측정하였다. 보정곡선을 Fig. 3.5.18에 나타내었다.



Fig. 3.5.16 Pressure transmitter



Fig. 3.5.17 Inclined manometer

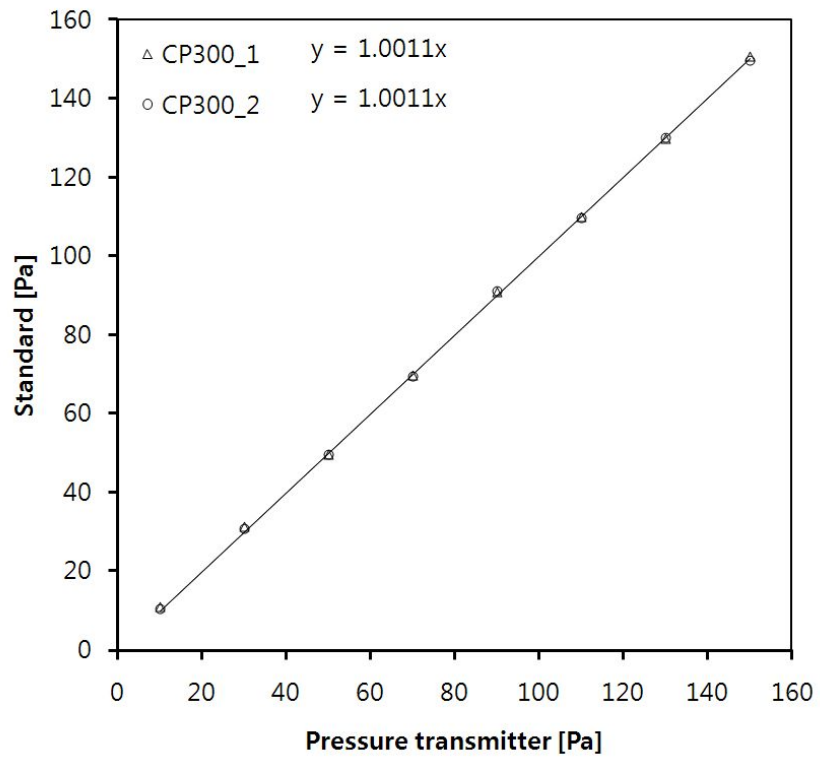


Fig. 3.5.18 Calibration curve of pressure transmitter sensor

(3) 해석모델 검증 실험

결로해석모델의 검증을 위해 실험장치를 구성하고, 풍량, 외기온도, 실내 상대습도를 변수로 하여 실험을 수행하였다. 실험은 크게 4가지로 구분할 수 있으며, Table. 3.5.4에 각 실험에 대한 설명과 변수, 실험조건을 정리하여 나타내었다.

Table. 3.5.4 Test conditions

Experiments	Parameters	Test conditions
Basic condition (no condensation)	RA temperature	28.2 ± 0.2 °C
	OA temperature	10.1 ± 0.2 °C
	Relative humidity	25.0 ± 2 %RH
	Flow rate	50 to 150 CMH
Effect of condensation	RA temperature	28.2 ± 0.2 °C
	OA temperature	10.1 ± 0.2 °C
	Relative humidity	68.0 ± 3 %RH
	Flow rate	50 to 150 CMH
Effect of outdoor air temperature	RA temperature	28.2 ± 0.2 °C
	OA temperature	10.0 ± 0.1 °C
		5.0 ± 0.1 °C
		-0.1 ± 0.1 °C
	Relative humidity	25.0 ± 3 %RH
	70.0 ± 3 %RH	
	Flow rate	100 CMH
Effect of room air relative humidity	RA temperature	28.2 ± 0.2 °C
	OA temperature	10.1 ± 0.2 °C
	Relative humidity	20~80 %RH
	Flow rate	100 CMH

실험장치의 타당성 입증을 위해 우선 결로가 발생하지 않는 조건에서 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 실험을 통해 고온측 및 저온측에서 열평형(Heat balance)을 비교하여, 열교환기에서 외부로 누설의 유·무 및 단열의 적정성을 판단하였다. 풍량조절을 위해 인버터를 사용하여 각 유량에 해당하는 차압이 되도록 설정하여 유량을 형성하였다. 데이터 획득은 30초마다 수행하였으며, RA, EA, OA, SA측 온도가 정상상태에 도달한 후 20분 동안 데이터를 산술평균한 값을 사용하였다.

결로 발생에 따른 열교환효율을 산정하기 위해 향온향습챔버내 온도와 습도를 각각 28 ℃, 68 %RH로 설정한 후 실험을 수행하였다. 설정 습도를 맞추기 위해 초음파가습기의 용량을 최대한 가동시킨 후 향온향습챔버내 냉각기의 온도 및 유량을 조절하였다. 데이터 획득은 온도와 습도가 정상상태에 도달한 후 20분 동안 데이터를 산술평균한 값을 사용하였으며, 실험이 끝난 후 실험장치 내부의 물기를 모두 제거한 후 다음 실험을 수행하였다.

외기온도가 낮을수록 열교환기내 결로량이 증가하여, 열교환효율이 증가한다. 따라서 외기온도 변화에 따른 열교환효율 변화에 대한 실험을 수행하였다. RA측 온도와 습도는

습도가 높은 조건인 28 ℃, 70 %RH와 습도가 낮은 조건인 28 ℃, 25 %RH로 설정하였으며, OA 온도는 10 ℃, 5 ℃, 0 ℃에 대해 온도를 감소시키면서 총 6case 실험을 수행하였다. 결로 발생 실험과 마찬가지로 다음 실험을 수행하기 전 열교환기내 물기를 모두 제거하였다.

실내 상대습도가 높아질수록 열교환효율이 증가한다. 실내 상대습도에 대한 열교환효율 변화에 대한 실험을 수행하기 위해 RA온도는 28 ℃, OA온도는 10 ℃로 설정한 후 상대습도를 10~90 %RH까지 변화시키며 실험을 수행하였다.

마. 수치해석 및 실험 결과

(1) 풍량 변화에 따른 열교환효율 (결로 발생 없음)

열교환기 효율 테스트를 위한 실험장치 및 실험방법의 정확성을 검증하기 위해 고온측과 저온측의 열평형(Heat balance)을 구하였다. 열교환기를 통한 열전달량은 다음과 같은 식을 사용하여 계산하였다. 여기서, 공기의 밀도(ρ) 및 비열(C_p)은 각각 고온측, 저온측 입·출구 온도의 평균값에 해당하는 물성값을 사용하였다.

$$Q_h = \rho_h \dot{Q}_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (26)$$

$$Q_c = \rho_c \dot{Q}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (27)$$

Fig. 3.5.19는 열교환기내 결로가 발생하지 않을 경우 열평형을 나타낸다. 고온측에서 손실한 열량보다 저온측에서 회수한 열량이 약간 높은 것으로 나타났으나, 모든 풍량 범위에 대하여 $\pm 5\%$ 이내에 열평형을 만족함을 보인다.

실험모델의 타당성 입증 및 결로에 의한 열교환효율 변화를 평가하기 위해 먼저 결로가 발생하지 않는 조건에서 실험값과 CFD 해석값을 비교하였다. Fig. 3.5.20, 3.5.21은 각각 결로가 발생하지 않는 조건에서 풍량 변화에 따른 EA, SA 온도를 실험값과 CFD 해석값을 서로 비교하여 나타낸 것이다. 각 실험 데이터에서 RA와

OA 온도조건은 $28.2 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $10.1 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 이고, RA 습도는 $25.0 \pm 2 \text{ \%RH}$ 로 각각이다. 풍량이 증가함에 따라 EA 온도는 증가하고, SA 온도는 감소함을 알 수 있다. 실험값과 CFD 해석 값의 오차는 3% 이내로 결과값이 서로 일치함을 보인다.

Fig. 3.5.22는 각각 결로가 발생하지 않는 조건에서 풍량 변화에 따른 열교환효율을 실험값과 CFD 해석값을 비교하여 나타낸 것이다. 열교환효율은 열교환기내 최대 온도차, 즉 실내온도(Room air)와 외기(Outdoor air)의 차에 대한 급기측 온도 증가량의 비로 정의되며, 다음과 같이 계산하였다.

$$\eta_t = \frac{T_{sa} - T_{oa}}{T_{ra} - T_{oa}} \quad (28)$$

풍량이 증가함에 따라 열교환효율은 감소함을 보이며, 기준 풍량인 100 CMH일 경우 약 62.4%을 효율을 나타내었다. 모든 풍량 범위에 대해 실험값과 CFD 해석 값의 오차는 약 4%로 나타났다.

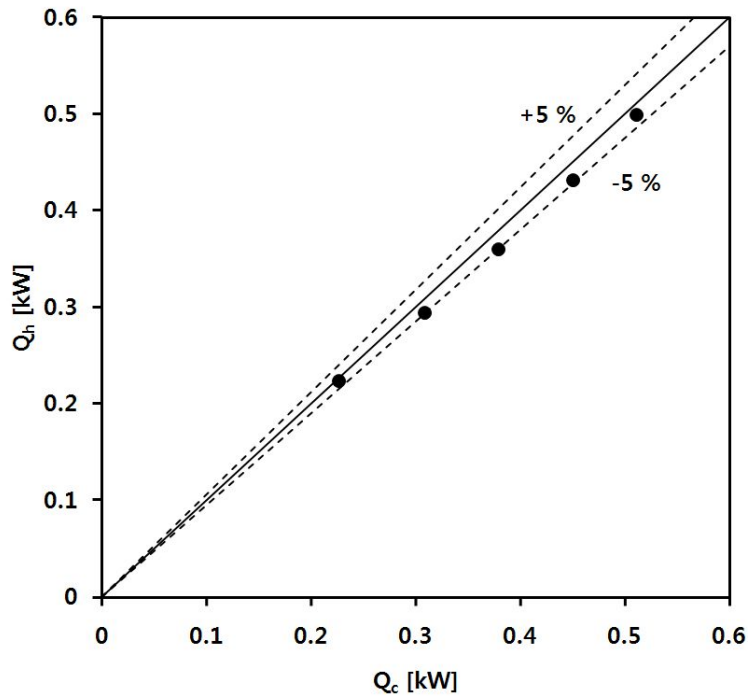


Fig. 3.5.19 Heat balance of the heat exchanger

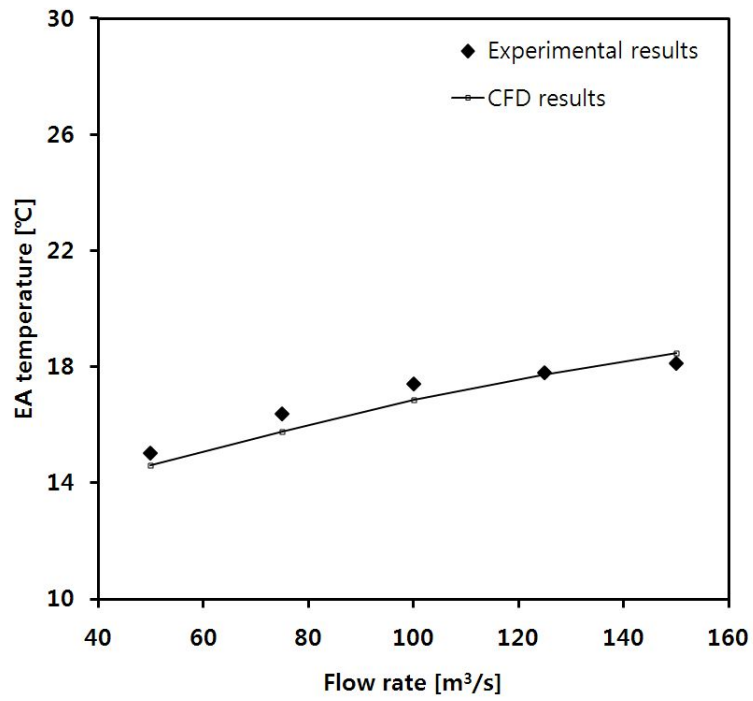


Fig. 3.5.20 Variation of EA temperature with flow rate (w/o condensation)

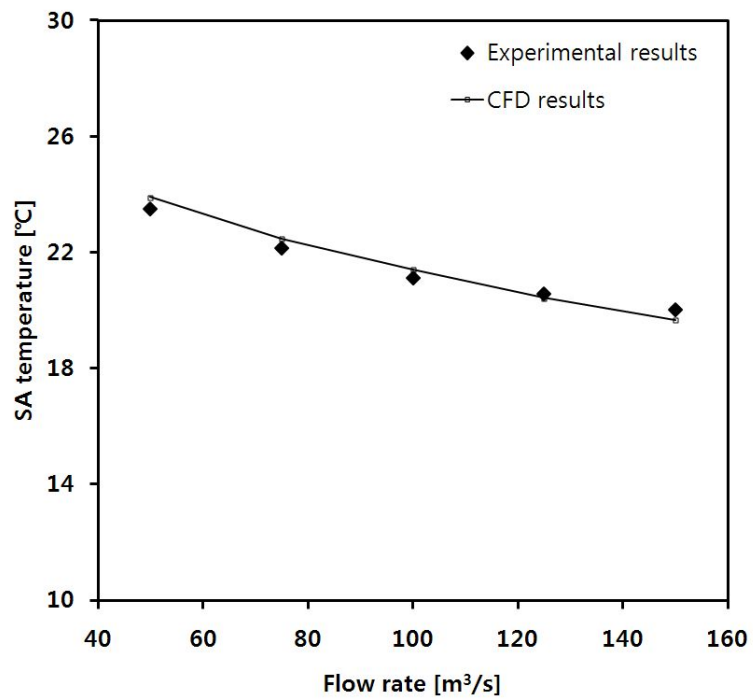


Fig. 3.5.21 Variation of SA temperature with flow rate (w/o condensation)

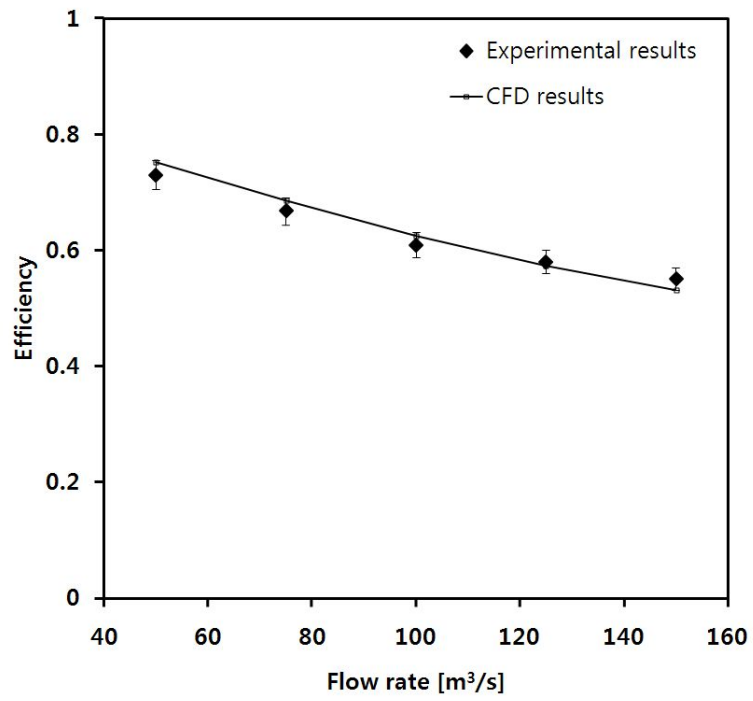


Fig. 3.5.22 Variation of temperature efficiency with flow rate (w/o condensation)

(2) 풍량 변화에 따른 열교환효율 (결로 발생 시)

결로 발생 시 열교환기 효율 테스트를 위한 실험장치 및 결로량 측정방법의 정확성을 검증하기 위해 다음과 같이 고온측과 저온측의 열평형(Heat balance)을 구하였다. 열교환기를 통한 각 고온측과 저온측의 열전달량은 아래와 같은 식을 사용하여 계산하였다. 고온측 열전달량은 식(29)에 나타난 바와 같이 입·출구 엔탈피 변화와 공기의 유량의 곱과 응축된 물의 엔탈피의 차로 나타낼 수 있으며, 저온측 열전달량은 입·출구 절대습도 변화가 없으므로, 식(30)와 같이 계산하였다.

$$Q_h = \rho_h \dot{Q}_h (h_{h,i} - h_{h,o}) - \dot{m}_w h_f \quad (29)$$

$$Q_c = \rho_c \dot{Q}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (30)$$

Fig. 3.5.23은 열교환기내 결로 발생 시 열평형을 나타낸 것으로, 모든 풍량 범위에 대하여 $\pm 10\%$ 이내에 열평형을 만족함을 보인다.

열교환면의 온도가 배기측 공기의 이슬점 온도 이하가 되어 결로가 발생하면, 상변화에 따른 잠열에 의해 EA측 공기의 온도가 상승하고, 이에 따라 열교환면을 통한 열전달량이 증가하여 SA측 공기의 온도도 상승한다. Fig. 3.5.24, 3.5.25는 각각 풍량 변화에 따른 EA, SA측 온도 변화를 실험값, 결로해석을 적용한 수치해석값, 그리고 결로해석을 적용하지 않은 수치해석값을 각각 비교하여 나타낸 것이다. 이때, RA와 OA 온도조건은 $28.2 \pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$, $10.1 \pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 이고, RA 습도는 $68.0 \pm 3\%$ RH로 각각이다. 열교환기내 결로 발생 시 발생된 결로로 인해 유로가 막혀 압력강하가 발생한다. 풍량이 100 CMH일 때 결로 발생에 의한 압력강하는 약 7 Pa로, 실험에서 결로 발생에 의한 압력강하를 보상하기 위해 열교환기내 결로가 발생한 후에 유량이 100 CMH로 흐르도록 인버터를 다시 설정하였다.

풍량이 증가할수록 SA측 온도는 감소하며, EA측 온도는 증가하는 경향을 나타낸다. Fig. 3.5.26는 풍량 변화에 따른 열교환효율을 실험값, 결로해석을 적용하지 않은 수치해석값, 그리고 결로해석을 적용한 수치해석값을 비교하여 나타낸 것이다. 그래프에 나타난 바와 같이 결로해석을 적용하지 않은 수치해석값은 상변화에 따른 잠열을 계산에 포함하지 않기 때문에 실험값을 정확히 예측하지 못하는 반면에, 결로해석을 적용한 수치해석은 비교적 실험값을 정확히 예측함을 알 수 있다. 결로해석 적용 시 기준 풍량인 100 CMH 일 때, 열교환기의 열교환효율은 약 68.7%로 결로해석을 적용하지 않은 해석 값에 비해 약 6.3% 증가한 것으로 나타났다. 모든 풍량 범위에 대해 실험값과 결로해석을 적용한 수치해석 값의 오차는 5% 이하의 차이를 보였다.

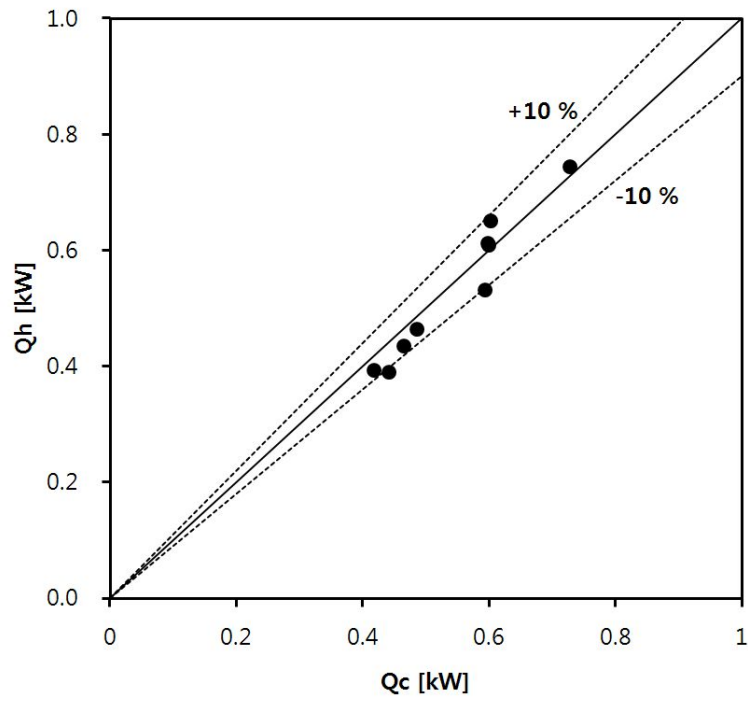


Fig. 3.5.23 Heat balance of the heat exchanger with condensation

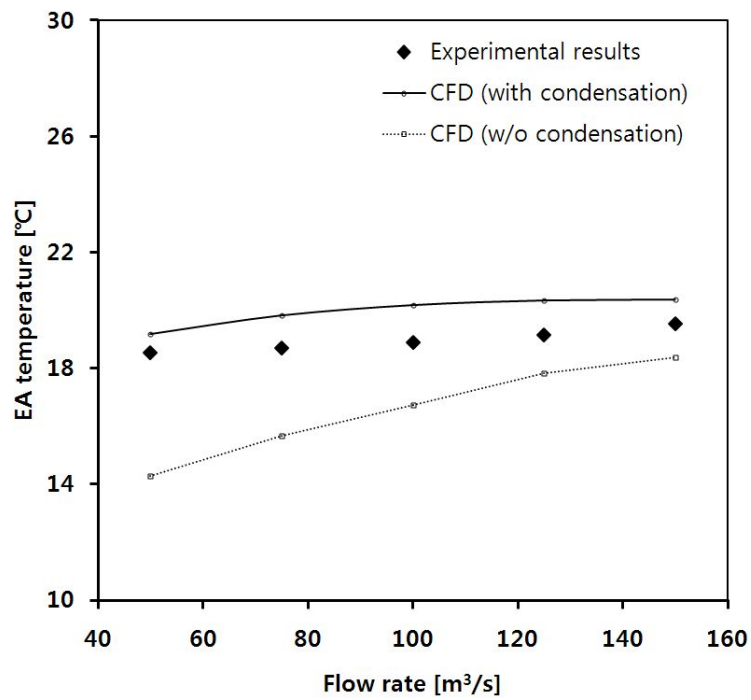


Fig. 3.5.24 Variation of EA temperature with flow rate (with condensation)

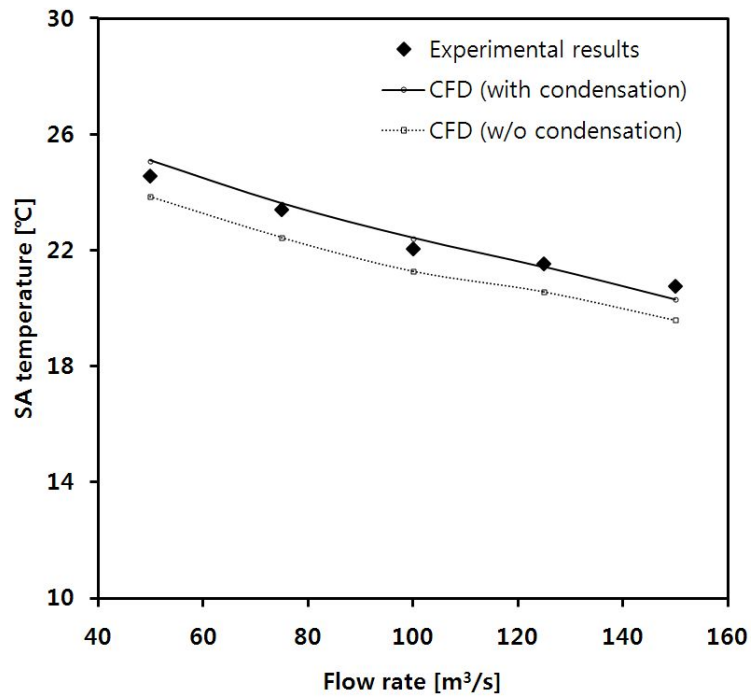


Fig. 3.5.25 Variation of SA temperature with flow rate (with condensation)

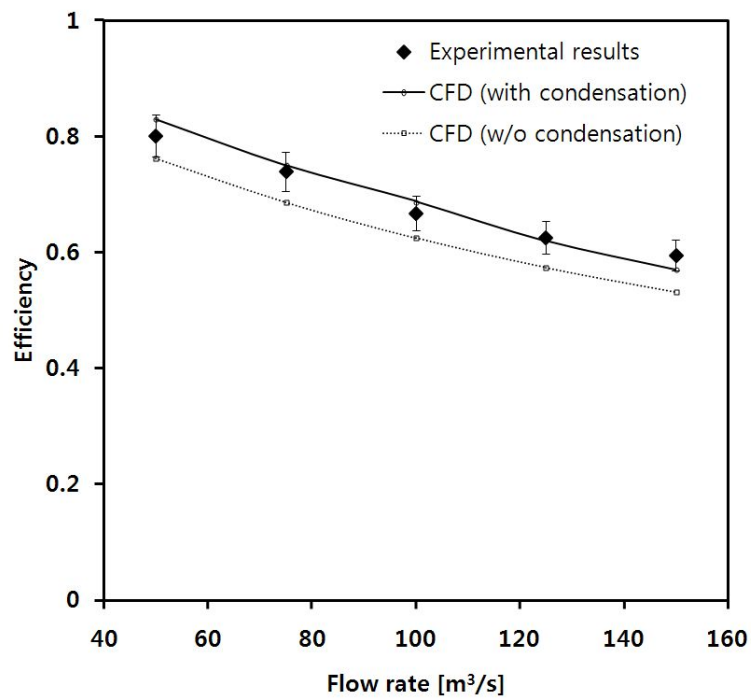


Fig. 3.5.26 Variation of temperature efficiency with flow rate (with condensation)

(3) 외기온도 변화에 따른 열교환효율

외기온도가 낮을수록 열교환면의 온도가 열교환기내 흐르는 공기의 이슬점온도 이하가 되는 면적이 증가한다. 결로발생면적이 증가함에 따라 결로량이 증가하고, 이에 따라 열전달률이 증가하므로, 외기온도에 따른 열교환효율을 분석하였다. 이때, 풍량은 기준풍량인 100 CMH이며, RA 온도는 $28.2 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 습도는 $70.0 \pm 3 \text{ \%RH}$, $25.0 \pm 3 \text{ \%RH}$ 이고, OA 온도는 $10.0 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, $5.0 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, $-0.1 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다.

Fig. 3.5.27, 3.5.28는 각각 상대습도가 각각 25, 70%일 때 외기온도에 따른 SA측 온도변화와 열교환효율 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3.5.27에 나타난 바와 같이 외기온도가 감소함에 따라 SA 온도가 감소함을 알 수 있다. 그러나 상대습도가 비교적 높은 70%인 경우 상대습도가 25%인 경우에 비해 외기온도 감소에 따른 SA 온도 감소율이 적음을 알 수 있다. 이는 결로 발생에 따른 열전달률이 외기 온도가 낮아질수록 더 증가하기 때문이다.

Fig. 3.5.28에 나타난 바와 같이 상대습도가 25, 70% 일 때 두 경우 모두 외기온도가 낮아질수록 열교환기의 효율이 높아짐을 알 수 있다. 이는 외기온도가 낮아질수록 열교환면의 온도가 낮아지게 되고 이에 따라 결로량이 증가하기 때문이다. 결로량 증가는 잠열에 의한 열전달량의 증가를 의미하며, 이로 인해 열교환기의 효율이 다소 증가한다.

상대습도가 25% 인 경우 외기온도가 낮아지더라도 결로량 증가율이 작기 때문에 외기온도감소에 따른 열교환효율 변화가 작지만, 상대습도가 70%인 경우 외기온도가 낮아짐에 따라 결로량 변화가 크기 때문에 외기온도감소에 따른 열교환효율 변화가 큼을 알 수 있다. 실험에서 외기온도가 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 감소할 때, 상대습도가 25%인 경우에 열교환효율이 약 3.7%, 상대습도가 70%인 경우에는 약 5.8%로 증가한 것으로 나타났다.

(4) 실내 상대습도 변화에 따른 열교환효율

결로 발생 시 열교환효율은 실내 상대습도가 높을수록 결로량 증가에 따른 열전달률이 증가하므로, 실내 상대습도에 따른 열교환효율 변화를 분석하였다. 실험에서 풍량은 기준풍량인 100 CMH이며, RA 온도는 $28.2 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$, OA 온도는 $10.0 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 인 상태에서 RA 상대습도를 10~90 %RH까지 변화시키면서 열교환효율을 구하였다. 결로해석을 적용한 전산유체해석은 RA 온도를 $28.0 \text{ }^\circ\text{C}$, OA 온도를 $10.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 설정한 후 RA 상대습도를 10~90 %RH에 대해 10 %RH씩 변화시키며 해석을 수행하였다.

Fig. 3.5.29은 실내 상대습도에 따른 열교환기의 효율을 나타낸 그래프로, 각각의 상대습도에 대해 실험값, 결로해석을 적용한 수치해석 값, 그리고 결로해석을 적용하지 않은 수치해석 값을 비교하여 나타낸 것이다. 실내 상대습도가 낮을 때는 결로량이 적기 때문에, 결로해석을 적용한 모델과 적용하지 않은 모델의 효율의 차이

가 거의 없지만, 실내 상대습도가 증가함에 따라 두 모델의 열교환효율의 차이가 증가함을 알 수 있다. 이는 열교환기 내에서 결로가 발생함에 따라 잠열에 의한 추가적인 열전달이 발생하여 열교환효율이 다소 증가했기 때문이다.

결로해석을 적용하지 않은 모델의 경우 상변화에 따른 열전달을 고려하지 않기 때문에 실험값을 예측하지 못하지만, 결로해석을 적용한 모델의 경우 실험값을 비교적 정확히 예측함을 알 수 있다. 실내 상대습도가 90%일 때 결로해석을 적용한 모델과 적용하지 않은 모델의 효율 차이는 13.7%로 나타났으며, 모든 실험에서 약 4% 이내로 결과값을 예측함을 나타내었다.

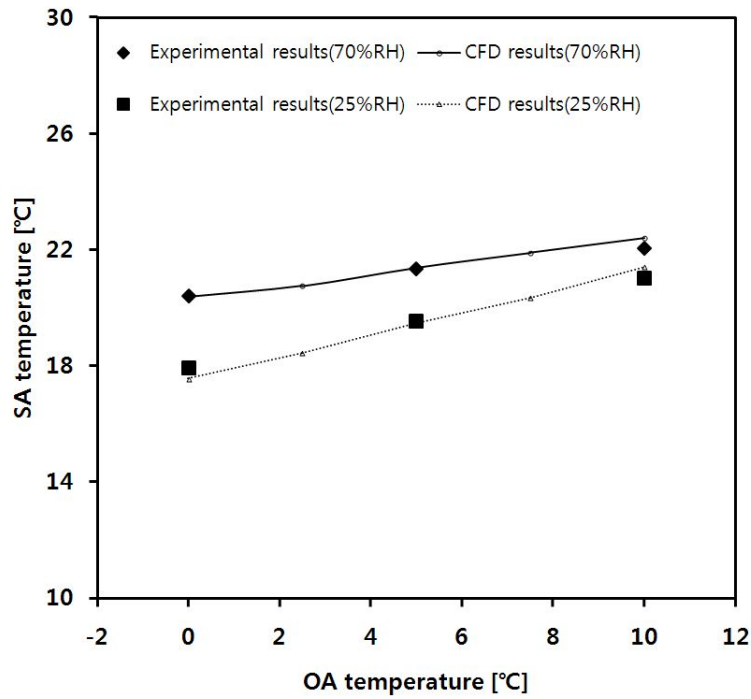


Fig. 3.5.27 Variation of SA temperature with outdoor temperature

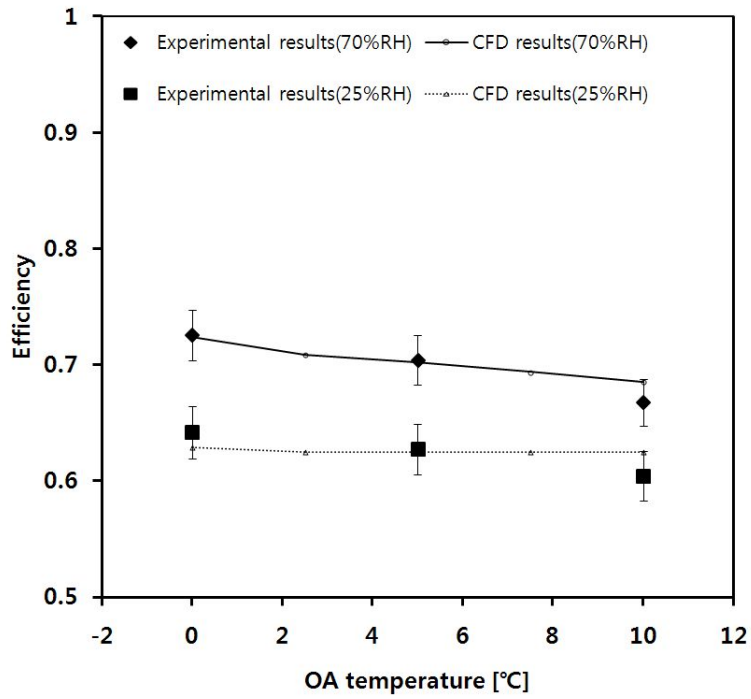


Fig. 3.5.28 Variation of temperature efficiency with outdoor temperature

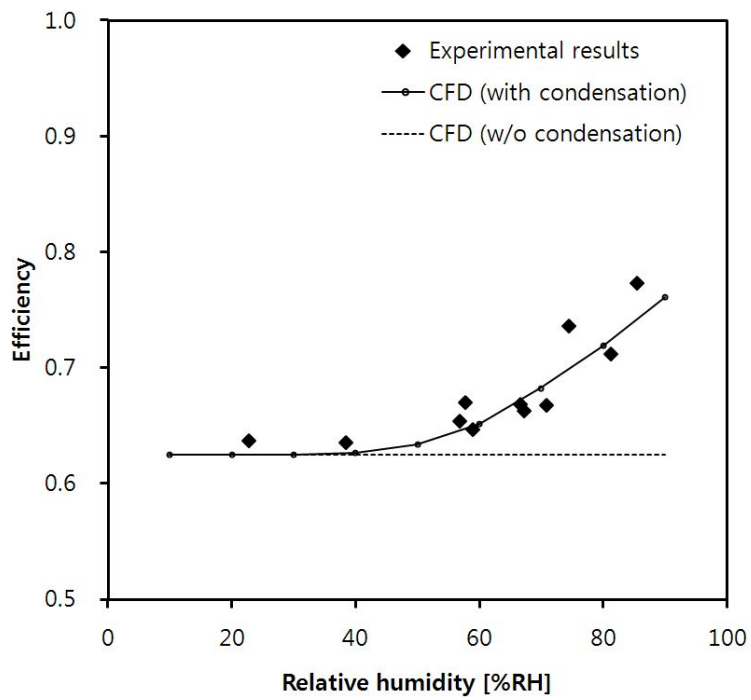


Fig. 3.5.29 Variation of temperature efficiency with relative humidity

(5) 열교환기내 결로량

Fig. 3.5.30은 실내 상대습도 변화에 따른 결로량을 나타낸 것으로, 배수로(Drain way)를 통해 응축된 물의 양을 직접 측정된 값을 결로해석을 적용한 수치해석 값과 실험으로부터 측정된 풍량, 절대습도로부터 계산된 결로량을 비교하여 나타낸 것이다. 이 때, 결로량은 다음과 같이 계산하였다.

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (W_i - W_o) \quad (31)$$

여기서, \dot{m}_w 는 결로량, \dot{m}_a 는 열교환기를 통과하는 공기의 유량이며 W_i , W_o 은 각각 RA, EA에서 절대습도를 나타낸다.

실험은 기준풍량인 100 CMH에서 수행되었으며, RA 온도는 28.2 ± 0.2 °C, OA 온도는 9.9 ± 0.2 °C인 상태에서 수행되었다. 실내 상대습도에 대한 결로량을 측정하기 위해 RA 상대습도를 50~90 %RH까지 변화시키면서 각 실험에 대해 결로량을 측정하였다. 수치해석은 실험값들은 평균값을 사용하여 RA 온도가 28.3 °C, OA 온도가 9.8 °C에서 상대습도를 50~90 %RH까지 10 %RH 간격으로 증가시키며 수행하였다. 결로량 측정은 열교환기를 가동하여 각 입·출구 온도 및 습도가 정상상태에 도달한 후 응축된 물이 배수로를 통해 충분히 축적된 시점부터 100분 동안 측정하였다.

Fig. 3.5.30에 나타난 바와 같이 실내 상대습도가 증가할수록 결로량이 증가함을 알 수 있다. 결로해석을 적용하지 않을 경우, 상변화에 의한 열전달 해석을 수행할 수 없으므로 EA 절대습도 값을 예측할 수 없지만, 결로해석을 적용한 경우 EA 절대습도 값 및 결로량을 비교적 정확하게 예측함을 알 수 있다. 모든 실험에서 실험을 통해 얻은 측정값은 결로해석을 적용한 수치해석값과 5% 이하의 오차를 보였다.

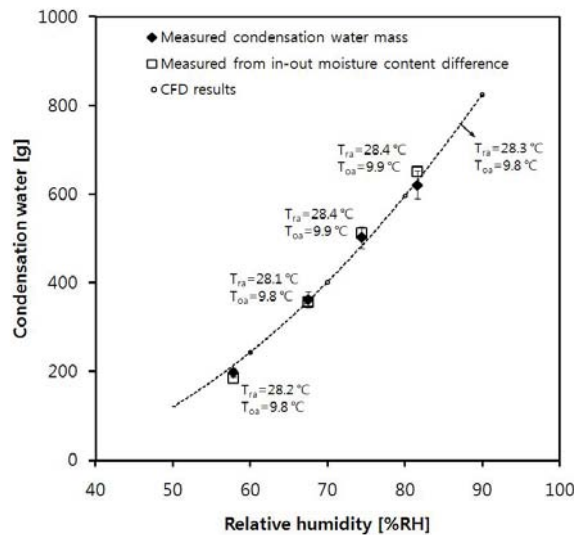


Fig. 3.5.30 Variation of condensation water with relative humidity

(6) 판형 열교환기내 온도분포

Fig. 3.5.31는 실내 상대습도가 75.8%, T_{ra} , T_{oa} 가 각각 23.1 °C, -0.5°C일 때 판형 열교환기 표면의 온도분포를 실험결과와 수치해석 결과를 서로 비교하여 나타낸 것이다. 표면의 온도분포를 획득하기 위해 사용된 TLC coated polyester sheet는 가장 바깥에 위치한 열교환기의 표면에 부착되었다. 수치해석에 적용된 결로해석모델은 표면에 응축된 물층에 의한 열전달 효과를 고려하지 않았기 때문에 실험과 수치해석으로부터 획득한 온도분포가 약간 차이를 보이지만, 온도분포의 형태 및 온도값이 거의 일치함을 보인다.

결로 발생에 따른 열교환기 표면의 온도분포를 특성을 알아보기 위해 상대습도가 서로 다른 조건에서 온도분포를 수치해석을 통해 분석하였다. Fig. 3.5.32은 실내 상대습도가 56.8 %RH일 때 결로해석을 적용한 모델과 적용하지 않은 모델의 열교환면에서 온도 분포를, Fig. 3.5.33는 실내 상대습도가 81.2 %RH일 때 결로해석을 적용한 모델과 적용하지 않은 모델의 온도분포를 나타낸 것이다. 두 온도분포 모두 결로해석을 적용한 모델의 온도분포가 결로해석을 적용하지 않은 온도분포에 비해 같은 위치에서 온도가 높음을 알 수 있다. 이는 결로해석모델의 경우 상변화에 의한 잠열에 의해 열전달량이 증가했기 때문이다.

상대습도가 비교적 낮은 Fig. 3.5.32의 온도분포에 비해 상대습도가 비교적 높은 Fig. 3.5.33의 온도분포가 경우 결로해석 여부에 따라 온도분포에 차이가 크게 발생함을 알 수 있다. 이는 상대습도가 낮을 경우 결로 발생량이 적어 열전달량 증가량이 적지만, 상대습도가 높을 경우 결로 발생량이 많아 열전달량 증가량이 크기 때문이다. 따라서 실내 상대습도가 높을수록, 결로에 의한 열전달효율 증가량을 무시할 수 없으므로, 이를 정확히 예측하는 것이 중요하다.

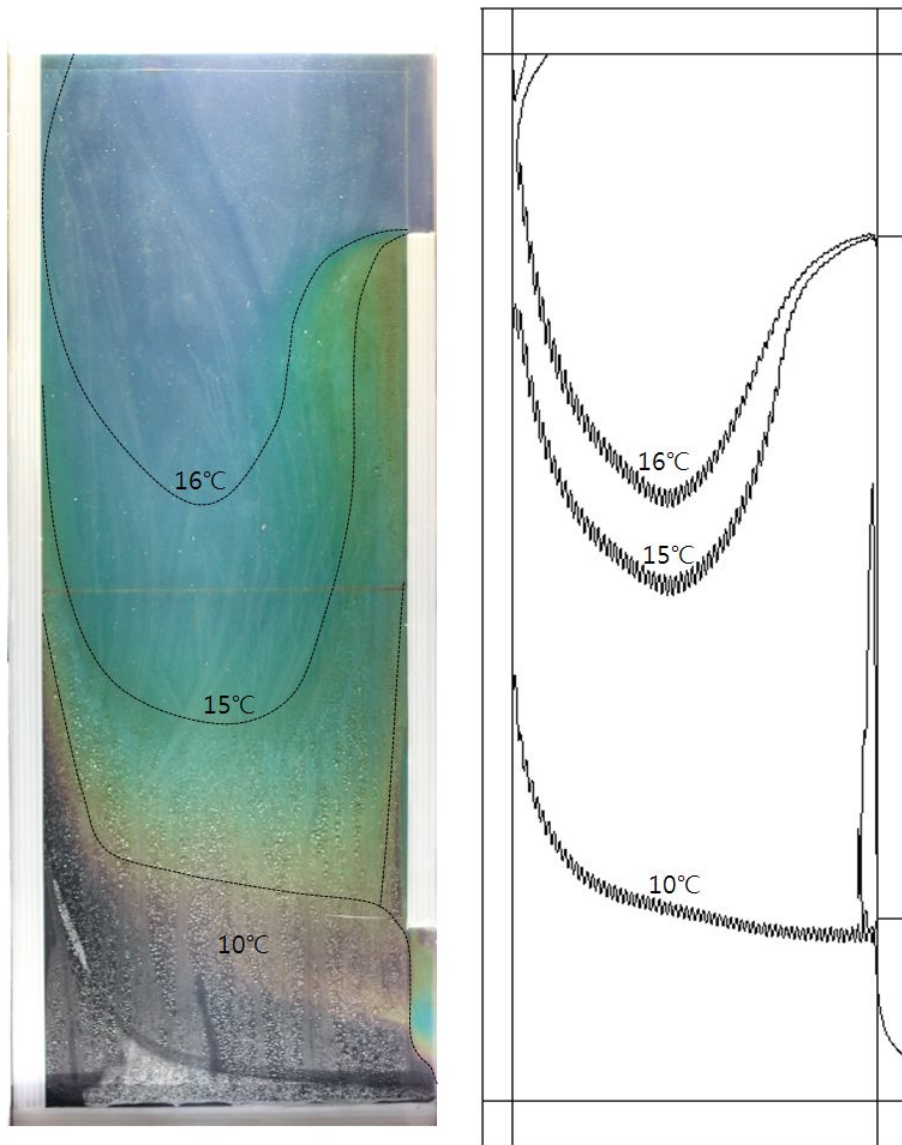
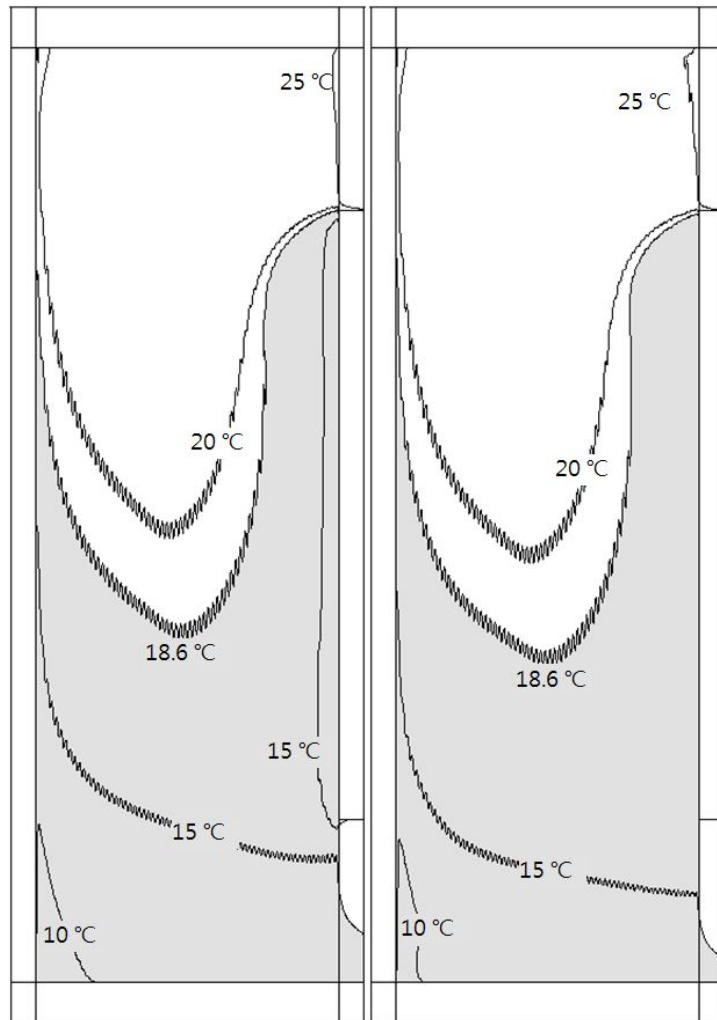


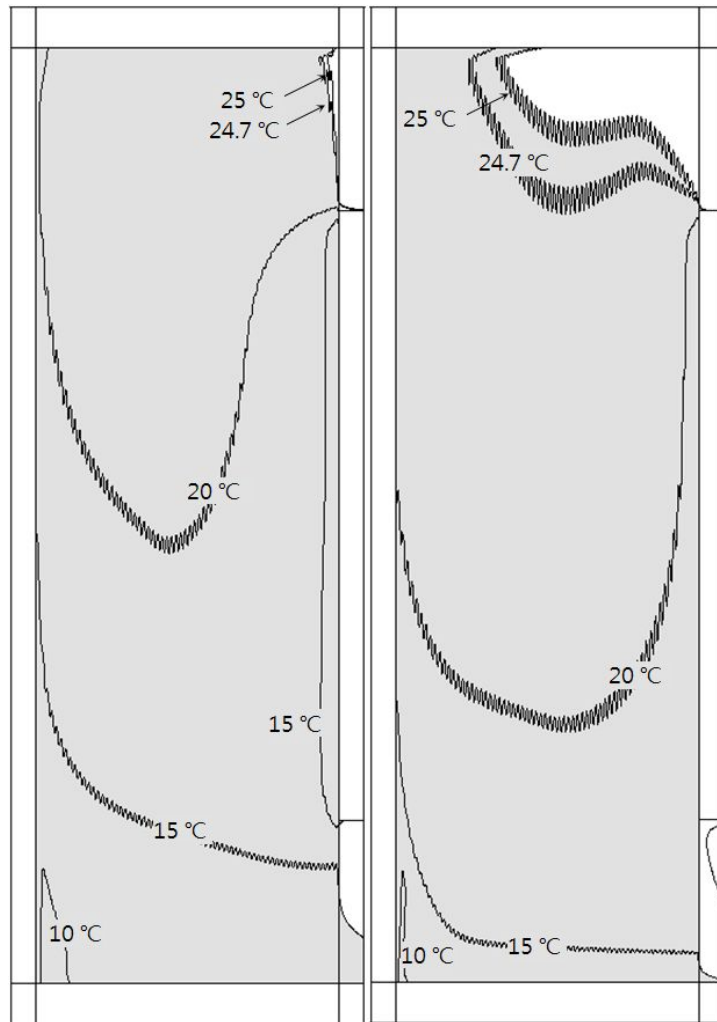
Fig. 3.5.31 Surface temperature contour ($T_{ra} = 23.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{oa} = -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)



(a) w/o condensation

(b) with condensation

Fig. 3.5.32 Surface temperature contour (56.8 %RH)



(a) w/o condensation

(b) with condensation

Fig. 3.5.33 Surface temperature contour (81.2 %RH)

바. 수치해석 결과

본 연구를 통해 동절기 계사의 높은 습도로 인해 열교환기내 결로 발생에 따른 열교환효율 변화에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 결로해석모델을 도입하여 풍량, 실내 상대습도, 외기온도에 따른 열교환효율을 전산유체해석을 통해 분석하였다. 또한 실험장치를 구성하여 이를 실험적으로 검증하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 결로 발생이 없는 경우, 열교환기내 풍량 증가에 따라서 열교환효율은 감소한다. 이 때, 실험값과 전산유체해석을 통해 얻은 값의 오차는 3% 이하로, 결과값이 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 결로가 발생하는 경우에도 풍량 증가에 따라서 열교환효율은 감소하지만 잠열에 의한 열전달량 증가로 인해 결로 발생이 없는 경우보다 평균 5.6% 높은 값을 보인다. 결로 발생 시 실험값과 전산유체해석을 통해 얻은 값의 오차는 5% 이하로, 결과값이 서로 잘 일치함을 확인하였다.

(2) 결로가 발생하지 않는 경우, 현열에 의한 열교환효율은 외기온도 및 실내 상대습도에 따라서 변하지 않는다. 결로 발생 시, 외기온도가 낮을수록, 실내 상대습도가 높을수록 결로량 및 결로발생면적이 증가하여 열교환효율이 증가한다. 외기온도가 10 °C에서 0 °C가 됨에 따라 상대습도가 75%일 때, 열교환효율이 약 6.1% 증가함을 보인다. 이 때 실험값과 전산유체해석을 통해 얻은 값의 오차는 3% 이하로, 결과값이 서로 잘 일치하였다. 또한 실내 상대습도가 증가할수록 결로량이 증가하므로, 열교환효율이 증가한다. 상대습도가 90%일 때, 결로해석적용 유·무에 따라 열교환효율은 약 13.6%의 차이를 보였으며, 모든 실험에 대해 실험값과 해석값은 5% 이하의 차이를 보였다.

(3) 결로해석을 적용하지 않은 수치해석모델의 경우 상변화에 따른 열전달 효과를 예측할 수 없으므로, 열교환기 출구에서 온도 및 습도를 예측할 수 없다. 반면에 결로해석을 적용한 경우 비교적 단순화된 방법으로 열교환면의 온도분포 및 결로 발생에 따른 결로량을 비교적 정확하게 예측함을 나타내었다. 결로량 측정 시 배수로를 통해 측정된 물의 양과 해석결과 값의 오차는 모든 실험에 대해 5% 이하로 결로량을 잘 예측함을 알 수 있다.

(4) 본 연구에서 적용한 단순화된 결로해석방법에 의하여 모든 결과에 대해 실험결과와 5% 이내에서 잘 일치함을 보인다. 열교환기내 결로 발생과 같은 상변화 과정을 수치해석적으로 묘사하기 위해서 열 및 물질전달해석에 대한 여러 가지 가정 및 복잡한 해석과정을 통해 분석해야 하지만 본 연구에서 정의한 가상비열 개념을 적용하여 비교적 정확하게 결로현상을 수치해석적으로 분석할 수 있다.

2. 육계사용 폐열회수 환기장치

가. 서론

본 연구에서는 전술한 열교환기의 수치해석결과를 바탕으로 열교환효율 70%이상 이면서 열교환기의 결빙문제를 해결하기 위한 해빙기능이 포함된 폐열회수 환기장치를 개발하였다.

Fig. 3.5.41.는 1차 시제품, Fig. 3.5.42.는 1차 시제품을 개선한 2차 시제품이다. 1차 시제품에서는 Fig. 3.5.38.의 해빙유로와 Fig. 3.5.37.의 필터시스템을 사용하고 있고, 2차 시제품은 Fig. 3.5.39.의 해빙유로와과 풍량제어댐퍼를 채택하고 있고 필터시스템을 사용하지 않았다. 두 시제품의 열교환기는 동일한 모델을 사용하였고, 환기풍량 및 열교환효율은 동일하다.

그리고 전열/현열 겸용의 폐열회수 환기장치를 개발하기 위해 전열교환기를 개발하였고 관련된 실험데이터 및 설계기술을 확보하였다.

나. 폐열회수 환기장치의 팬 배열

폐열회수 환기장치(HRV)에서 일반적인 팬 배열은 Fig. 3.5.34과 같이 급기팬은 급기(SA) 유출 챔버, 배기팬은 배기(EA) 유출 챔버 쪽에 위치하는 음압식 방법을 사용한다. 이러한 배열은 배출공기유로에서 공급공기유로로 누설되는 공기의 양을 최소화하고 난방시 모두 사용하는 점을 고려한 것이다. 육계사용 폐열회수 환기장치에서 EA측 공기는 과습 상태로 배출되므로 배기팬을 배기(EA) 유출 챔버 쪽에 위치시키는 것은 팬 고장을 유발시키는 원인이 되므로 적절하지 않다. 더구나 육계사용 폐열회수 환기장치는 난방시에만 사용하고 냉방시에는 사용하지 않는다. 이러한 점을 고려하여 배기팬을 실내공기(RA) 유입 챔버 쪽에 위치시키는 것이 기기의 유지보수와 열교환효율 측면에서 보다 효과적이라 판단된다.

육계사용 폐열회수환기장치에서 팬의 배열을 Fig. 3.5.35와 같이 배기팬을 실내공기(RA) 유입 챔버 쪽에 위치시킨 음압/양압식 방법의 사용하였다.

다 열교환기 및 열교환효율

위에서 설명한바와 본 연구에서 사용할 열교환소자는 대항류형이다. 열교환 과정에서 결로 발생이 필연적이므로 응축수의 제거가 원활히 이루어지도록 실내에서 실외로 배출되는 공기가 상부에서 하부로 흐르도록 열교환기의 실내공기(RA)측을 위로, 배기(EA)측은 아래에 위치하도록 배열하였다. 본 연구에서 목표로 하는 폐열회수 환기장치의 열교환효율은 75%로서 공기조건은 온도 25°C, 상대습도70%인 실내공기와 온도 2°C 실외공기 조건이다. 이러한 공기조건에서는 결로에 의한 응축수가 발생되므로 응축수 발생시 수반되는 잠열효과와 팬의 발열 에너지를 고려하면 결로가 발생되지 않는 공기조건에서의 열교환기 효율이 75%가 될 필요는 없다. 본 연구에서는 잠열효과와 팬 발열에너지 효과를 고려하여 수치해석 결과를 토대로 건공기

조건에서 열교환기의 열교환효율이 70%가 되도록 설계하였다.

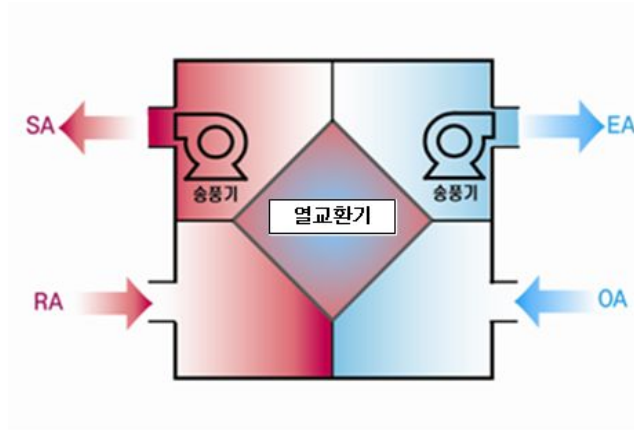


Fig. 3.5.34 음압식 폐열회수 환기장치

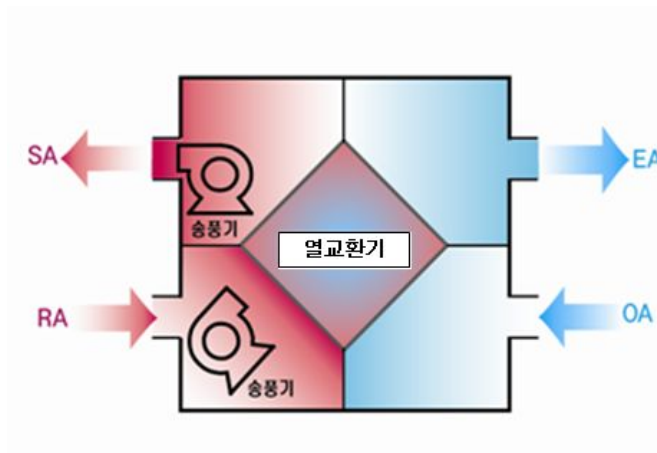


Fig. 3.5.35 음압/양압식 폐열회수 환기장치

Fig. 3.5.36은 위에서 언급한 기준에 의해 개발된 열교환소자이다. 열교환기에서 실외에서 실내로 공급되는 공급공기 유로는 좁고 긴 형태이고, 실내에서 실외로 배출되는 배출공기 유로는 응축수와 부유먼지의 제거를 원활히 하기 위해 넓고 긴 형태를 유지하도록 하였다. 배출 공기에서 발생하는 응축수가 중력에 의해 자연스럽게 배출되도록 하기 위해 배출 공기는 상부에서 하부로 흐르도록 유로를 형성하였다(RA:상부, EA:하부). 공급공기 유로는 대항류 열교환이 이루어지도록 아래에서 위로 공기흐름이 형성되도록 하였다(OA:하부, SA:상부). 열교환기 외부는 열손실 방지를 위해 단열 처리하였고 누설방지를 위해 RA/SA, EA/OA 경계면에는 실리콘 처리를 하였다. 이 열교환기는 결로가 발생되지 않는 공기조건에서 풍량 1,250CMH에서 열교환효율 70%를 가지도록 설계/제작하였다.

라. 필터

필터는 배출공기에 포함된 부유먼지로 인한 열교환기의 배출공기 유로 막힘을 예방하기 위한 것이다. 따라서 필터는 배출공기 유로 중에 설치하여야 하고 사용 중 포집된 먼지로 인해 배출 공기의 유량이 감소하는 것을 방지하기 위해 필터를 자동 세정하는 기능이 있어야 한다. 필터의 위치는 배기팬의 입구에 설치하는 것이 좋지만 사전 실험결과 배출공기에 포함된 부유먼지가 배기팬에 악영향을 끼치지 않는 것으로 판단되므로 경제성과 제작용이성을 고려하여 배기팬의 출구와 열교환기 사이에 설치하였다.

Fig. 3.5.37은 본 연구에서 개발된 육계사용 폐열회수 환기장치에 설치된 자동세정 기능을 가진 필터시스템을 점검구를 열어서 본 것이다. 대칭구조로 설치된 열교환기 사이의 공간에 필터시스템을 설치하였다. 부유먼지가 포함된 실내공기는 배기팬과 기기 내부의 유로를 통해 필터 아래쪽으로 유입되고, 필터를 거쳐 열교환기의 실내공기(RA) 유입구쪽으로 이동하는 구조이다. 진동모터는 주기적으로 작동하여 필터를 진동시키고, 필터에 포집된 부유먼지를 아래로 떨어뜨린다. 필터는 물세척이 가능하므로 진동으로 제거되지 않은 부유먼지는 사용자가 물 세척으로 제거할 수 있다. 필터에 누적된 부유먼지를 주기적으로 제거하여 배기측 공기의 압력손실을 최소화하는 것이 폐열회수 환기장치의 열교환효율을 유지시키는데 도움이 된다. 이를 위해 필터시스템에 진동모터를 부착하여 주기적으로 필터를 청소하는 방법을 선택하였다. 필터 청소시에는 급기팬, 배기팬의 작동을 중지시켜 청소가 원활히 이루어지도록 운영하였다.

마. 폐열회수 환기장치의 해빙 및 점검시스템

육계사용 폐열회수 환기장치에서 예상되는 가장 큰 문제는 배출공기에 포함된 부유먼지나 결빙에 의해 배출공기 유로가 막혀 사용가능한 열교환면이 감소하고 배출공기량이 감소하여 열교환효율이 감소하는 것이다. 이런 문제를 방지하면 점점 폐열회수 환기장치의 주요 기능중 하나인 에너지 회수율이 감소하게 되고 궁극적으로

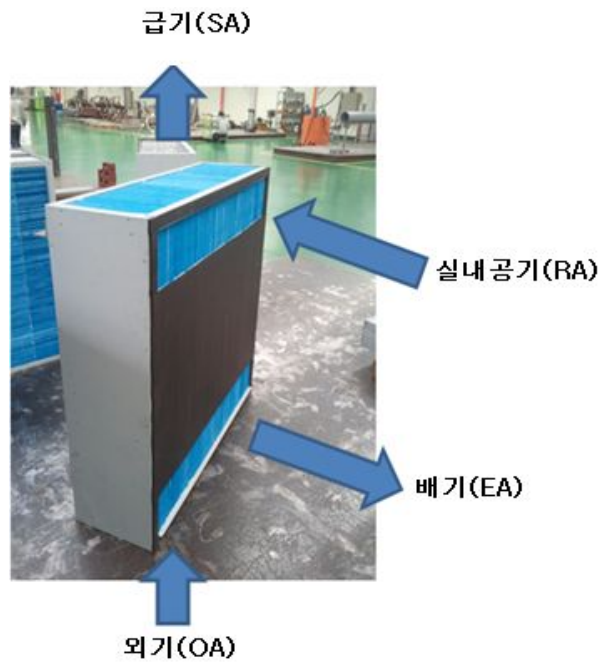


Fig. 3.5.36 대항류 열교환기



Fig. 3.5.37 필터시스템

로 그 기능을 상실하게 된다.

동절기에 발생하는 열교환기의 결빙로 인한 배출공기 유로 막힘 현상도 완전히 제거할 수 없다. 동일한 구조의 열교환기에서 열교환기의 열교환효율이 높을수록 결빙현상이 빨리 나타나고 본 연구에서 채택한 형태로 열교환기의 구조를 변경하여도 결빙현상을 완벽히 제거할 수 없다. 폐열회수 환기장치의 외기유입 챔버에 전기 히터 등의 열원을 설치하여 외기온도가 결빙을 발생시키는 온도이하로 내려가면 에너지를 공급하여 열교환기에 유입되는 외기온도를 결빙시작 온도 이상으로 가열하면 폐열회수 환기장치의 결빙을 예방할 수 있으나 추가 에너지가 필요하므로 현실적인 대안이 아니다.

폐열회수 환기장치에 결빙이 발생하더라도 외기온도가 영상이상으로 올라가면 자연스럽게 해결되겠지만 그때까지는 폐열회수 환기장치를 사용할 수 없으므로 결빙 상태를 정확히 파악하여 단 시간 내에 해빙해야 한다. 폐열회수 환기장치에서 열교환기를 해빙하는 해빙운전에서 실내공기를 열교환기로 유입시켜 해빙에너지로 사용한 후 다시 실내로 재 유입시키거나 실외로 배출하는 방법을 가장 많이 사용한다. 본 연구에서 개발된 폐열회수 환기장치는 육계사 실내공기의 특성으로 인해 Fig. 3.5.35.와 같은 음압/양압식 방법을 채택하고 있으므로 기존의 음압식 폐열회수 환기장치에서 채택하고 있는 해빙시스템을 사용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3.5.38.과 Fig. 3.5.39.의 두 가지 방안을 가지고 그 효용성을 평가한 후 최종 해빙시스템으로 선택하고자 한다.

Fig. 3.5.38.은 급기팬이 설치된 급기 유출 챔버에 실외공기의 바이패스 유입구를 설치하고 유로선택 댐퍼를 설치한 구조이다. 유로선택 댐퍼가 바이패스 유입구를 차단한 상태에서는 외기(OA)는 열교환기를 통과하면서 급기(SA)로 실내로 공급되고, 실내공기(RA)는 열교환기를 통과하면서 배기(EA)로 되어 실외로 배출되는 정상운전이 된다. 유로선택 댐퍼가 바이패스 유입구를 열어둔 상태에서는 대부분의 외기(OA)는 바이패스 유입구를 통해 급기 유출 챔버로 유입되고 일부 외기(OA)는 열교환기를 통과한 후 급기 유출 챔버로 유입된다. 따라서 실내로 공급되는 급기(SA)는 대부분 열교환하지 않은 상태이므로 외기(OA) 온도로 실내로 공급된다. 실내공기(RA)는 정상운전과 마찬가지로 열교환기를 통과하면서 결빙된 열교환기를 해빙하고 배기(EA)로 배출된다. 이런 방법은 해빙운전 중에 계속 환기할 수 있으므로 환기효율에 영향을 주지 않는 장점이 있으나 배출공기와 결빙부분의 접촉 면적이 작으므로 해빙시간이 긴 단점이 있다.

Fig. 3.5.39.는 배기팬이 설치된 실내공기 유입 챔버와 외기 유입 챔버를 연결하는 바이패스 통로와 외기 유입구를 선택할 수 있는 유로선택 댐퍼를 설치한 구조이다. 유로선택 댐퍼가 바이패스 통로를 차단하고 외기 유입구를 열어둔 상태에서는 외기(OA)는 열교환기를 통과하면서 급기(SA)로 실내로 공급되고, 실내공기(RA)는 열교환기를 통과하면서 배기(EA)로 되어 실외로 배출되는 정상운전이 된다. 유로선택 댐퍼가 바이패스 통로를 열고 외기 유입구를 차단하면 외기(OA) 유입은 차단되

고 실내공기(RA)는 실내공기 유입 챔버, 바이패스 통로, 외기 유입 챔버, 열교환기의 공급공기 유로, 급기 유입 챔버를 거쳐 실내로 재유입된다. 이때 실내공기가 열교환기를 통과하면서 열교환면을 통해 배출공기 유로에 결빙부분에 에너지를 전달하여 해빙한다. 이런 방법은 해빙운전 중에 환기가 중단되므로 환기효율이 나빠지지만 해빙을 위한 실내공기와 결빙부분의 접촉 면적이 크므로 해빙시간이 짧은 장점이 있다.

해빙기능을 가진 폐열회수 환기장치에서 해빙유로를 구성하는 방법과 더불어 해빙시작과 종료를 결정하는 방법도 매우 중요하다. 해빙시작 시점이 너무 늦으면 결빙으로 기능이 저하된 폐열회수 환기장치를 장시간 사용하는 문제가 있고, 너무 이른 해빙은 해빙 횟수가 증가하여 해빙으로 인한 환기효율 감소 또는 총 에너지 절감율이 감소한다. 해빙 시작을 결정하기 위해서는 열교환기의 결빙상태를 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 기존의 방법은 결빙상태를 파악하기 위해 배출공기 유로에 두 개의 압력센서를 설치하거나, 단순히 외기온도만 측정하여 해빙시점을 결정하였다. 압력센서를 사용하는 것은 결빙상태를 비교적 정확히 파악할 수 있으나 센서의 가격이 고가인 단점이 있고, 온도센서를 사용하여 단순히 외기온도만 측정하는 방법은 정확성을 기하기 어렵다. 결빙의 정도는 단순히 외기온도에 의해 결정되지 않고 실내공기의 온도, 습도, 열교환기의 효율 등에 결정되기 때문이다. 폐열회수 환기장치에서 결빙 문제를 해결하려는 주된 이유는 결빙으로 인한 환기장치의 열교환효율 감소이다. 따라서 열교환효율을 해빙운전 시점을 결정하는 지표로 하는 것이 가장 합리적이다.

열교환효율에서 엔탈피교환효율은

$$\epsilon = \frac{\rho_S Q_S (h_S - h_O)}{C_{\max} (h_R - h_O)} \quad (32)$$

여기서

$$C_{\max} = \text{Max}(\rho_S Q_S, \rho_R Q_R),$$

ρ_S, ρ_R : 급기(SA), 실내공기(RA) 밀도

Q_S, Q_R : 급기(SA), 실내공기(RA) 풍량

h_S, h_R, h_O : 급기(SA), 실내공기(RA), 외기(OA) 엔탈피

이다. 결빙에 의해 배출공기 유로가 막히면 배출공기량이 감소하므로 식(32)의 $C_{\max} = \rho_S Q_S$ 로 된다. 본 연구에서 개발한 폐열회수 환기장치는 현열교환기이다. 따라서 엔탈피교환효율보다는 식(33)으로 표현되는 온도교환효율이 중요하므로 결빙상태를 파악하기 위한 인자로 사용하기로 한다.

열교환효율에서 온도교환효율은

$$\epsilon_T = \frac{T_S - T_O}{T_R - T_O} \quad (33)$$

여기서

T_S, T_R, T_O : 급기(SA), 실내공기(RA), 외기(OA) 온도

따라서 본 연구에서는 외기 유입 챔버, 실내공기 유입챔버, 급기 유출챔버에 각각 온도센서를 설치하여 외기온도, 실내공기온도, 급기온도를 측정하고, 온도교환효율을 구하여 결빙상태를 파악한다. 예를 들어 정상운전 중에 온도교환효율이 70% 또는 60%로 낮아지면 해빙을 시작하는 방법이다.

배출공기의 부유먼지로 인한 배출공기 유로 막힘을 예방하기 위해 자동세정 기능을 가진 필터시스템을 설치하고, 배출공기 유로 폭을 크게 하여 부유먼지가 자연 배출하도록 유도하고 있으나 근원적으로 부유먼지의 누적을 예방할 수 없다. 따라서 부유먼지의 누적으로 인한 폐열회수 환기장치의 기능 감소를 실시간으로 파악하여 일정 수준 이상의 기능이 상실되면 배출공기유로를 청소할 수 있는 점검시스템이 필요하다. 배출공기 유로 막힘이 발생하면 결빙에 의한 유로 막힘과 마찬가지로 온도교환효율이 감소한다. 그러므로 결빙상태 파악과 마찬가지로 열교환기의 온도교환효율을 먼지로 인한 유로 막힘 상태를 파악하는 주요 지표로 사용할 수 있다.

Fig. 3.5.40은 해빙운전과 점검운전을 위한 Flow chart로 순서는 다음과 같다.

1. 측정한 열교환효율(ϵ_T)이 해빙시작 효율(ϵ_D)보다 높으면 정상운전이다.
2. 측정한 열교환효율(ϵ_T)이 해빙시작 효율(ϵ_D)보다 낮고, 외기온도(T_O)가 설정한 결빙 발생시작온도(T_D)보다 낮으면 해빙운전을 하고, 높으면 점검운전을 판단한다.
3. 측정한 열교환효율(ϵ_T)이 점검시작 효율(ϵ_A)보다 낮으면 점검운전이고, 높으면 정상운전이다. 여기서 점검시작 효율(ϵ_A)은 해빙시작 효율(ϵ_D)보다 낮게 설정한다.
4. 해빙운전에서 설정한 운전시간이 경과한 후 해빙운전을 종료하고 정상운전으로 복귀한다.
5. 점검운전에서는 분진에 의한 유로 막힘이 예상되므로 사용자에게 열교환기 점검정보만 하고 정상운전 상태를 유지한다.

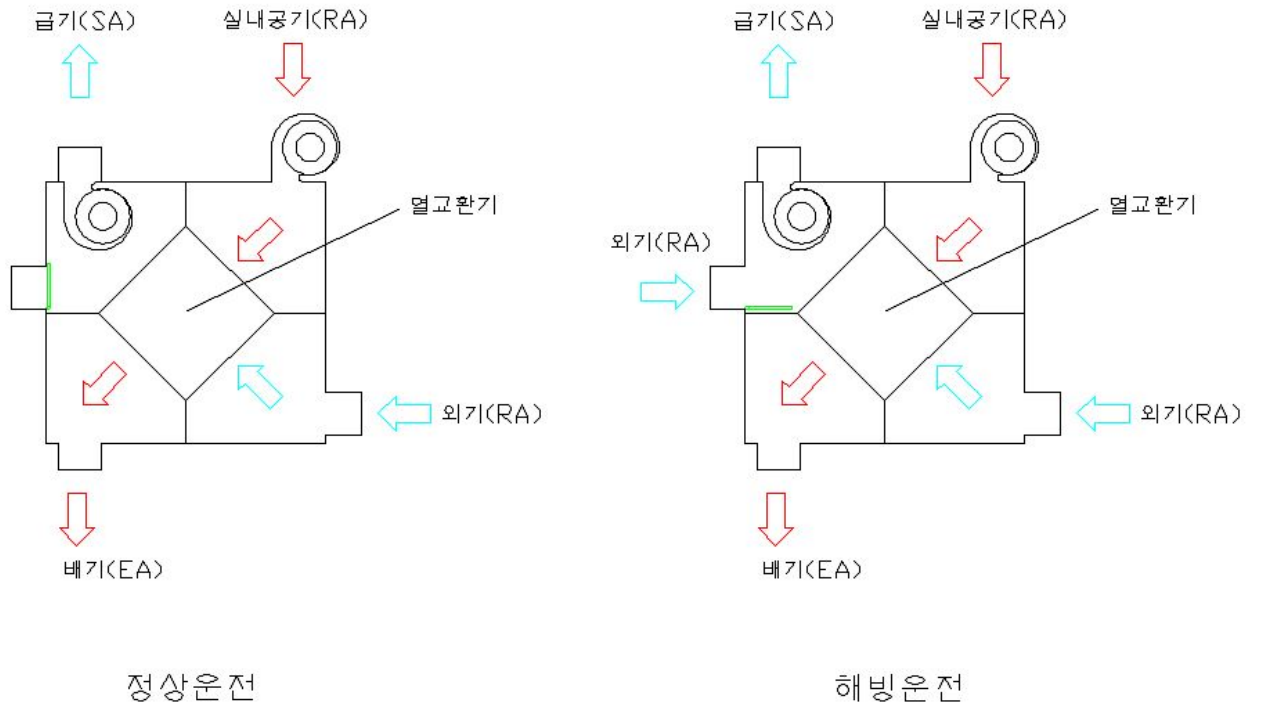


Fig. 3.5.38 해빙유로1

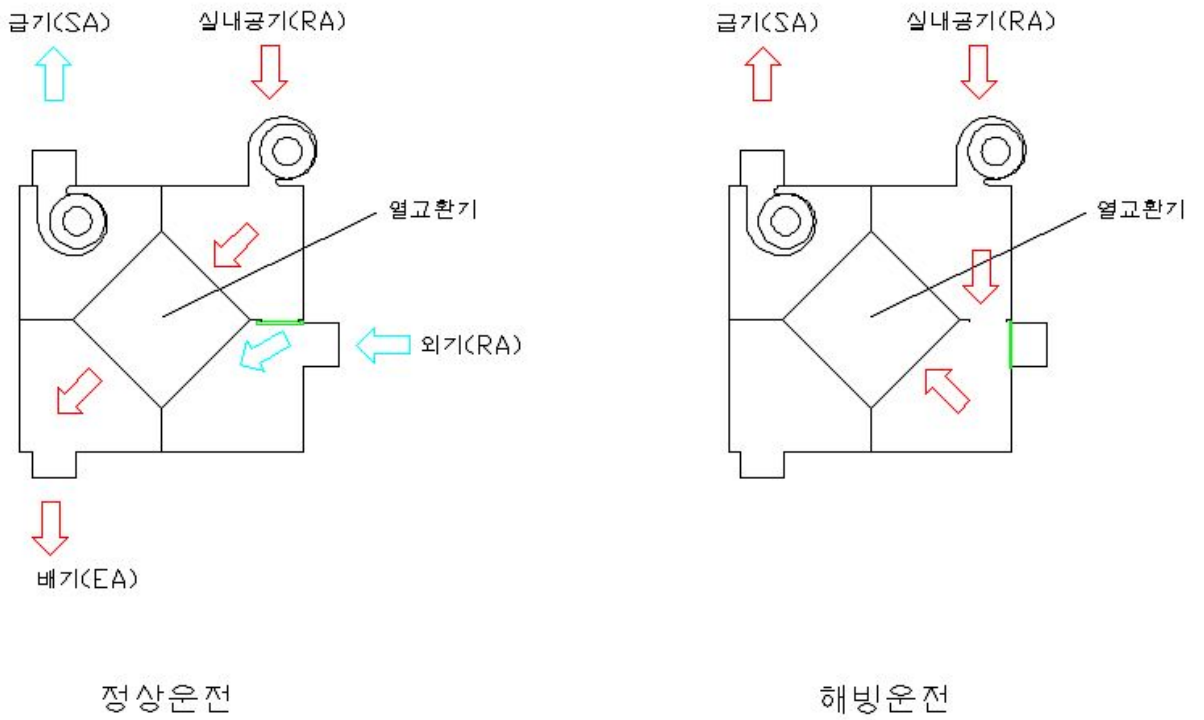


Fig. 3.5.39. 해빙유로2

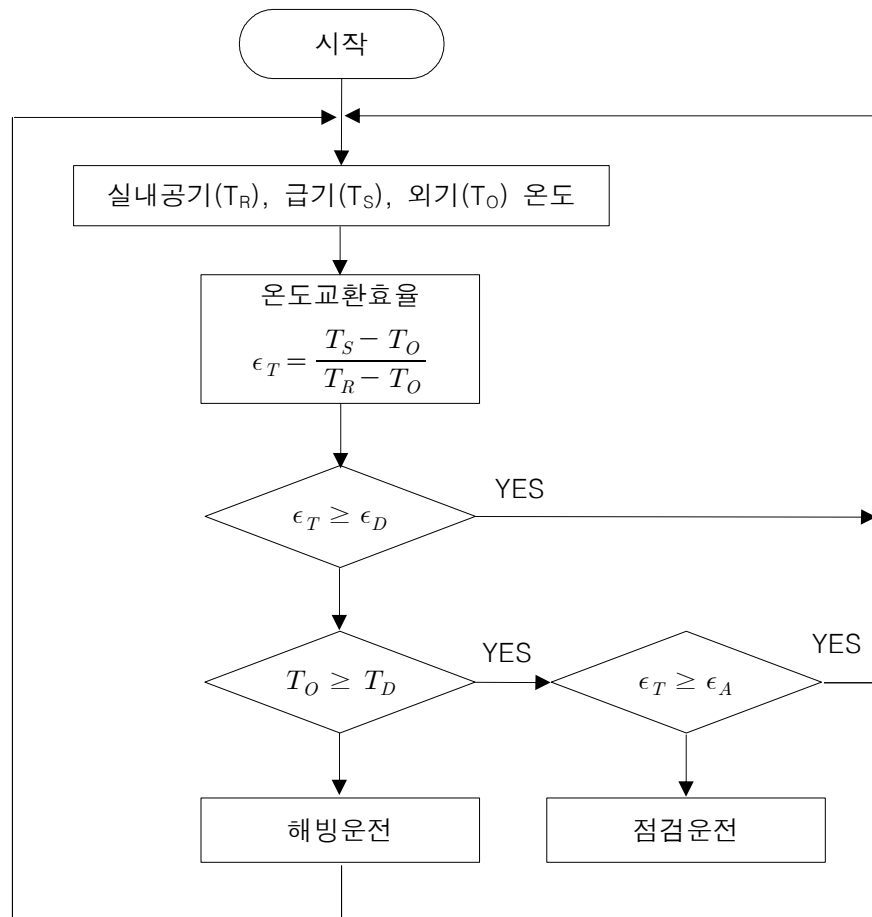


Fig. 3.5.40. 해빙 및 점검운전

바. 폐열회수 환기장치의 구성 및 제작

Fig. 3.5.41.과 Fig. 3.5.42.는 Fig. 3.5.36.의 열교환기 2개를 서로 마주보도록 하여 제작한 육계사용 폐열회수 환기장치(HRV) 1, 2차 시제품이다. 급기측과 배기측 팬은 기기 상부의 급기측 공기가 체류하는 챔버에 배치하여 팬에서 발생하는 열량을 급기측 공기가 모두 회수할 수 있도록 하였다. 배기(EA) 출구와 외기(OA)의 입구는 서로 반대 방향에 배치하여 기기 외부로 유출된 EA가 OA와 혼합되는 것을 방지하였다.

1차 시제품의 유로선택 댐퍼는 기기의 OA쪽에 설치하였고, 해빙운전이 필요시 댐퍼를 열어 열교환되지 않은 외기가 급기팬을 통해 계사내부로 유입될 수 있도록 하였다. 점검구는 필터를 청소하거나 기기 내부에 쌓인 부유먼지를 제거하기 위해 사용자가 열기 쉽도록 제작 하였다. 1차 시제품은 Fig. 3.5.38.의 해빙유로를 갖고, Fig. 3.5.37.의 필터시스템을 채택한 모델이다.

2차 시제품은 Fig. 3.5.39.의 해빙유로를 갖고 급기(SA) 출구와 실내공기(RA)의 입구에 풍량조절 댐퍼가 설치하여 HRV의 환기량을 조절하도록 하였다. 필터시스템은 제거하여 배출공기에 포함된 분진이 자연 배출되도록 유도하였다.

본 연구에서는 3종류의 HRV Controller를 제작하였다.

Fig. 3.5.44.는 기존 육계사의 환기장치인 배기팬, HRV, 육계사 내부 온도센서 등으로 구성된 육계사 복합 환기시스템에 사용되는 HRV의 Controller이다. 이 Controller는 육계사 복합 환기시스템의 Main Controller와 통신, 상호 데이터를 교환하면서 HRV를 운전한다. Main Controller로부터 배정받은 환기량을 기준으로 정상운전을 하며 해빙운전 조건이 발생하면 Main Controller에 신고, 허락 후 해빙운전을 하고, 점검운전 조건이 발생하면 Main Controller가 사용자에게 점검 경보를 통보하도록 데이터를 전송한다.

Fig. 3.5.45.(SD type)와 Fig.3.5.46.(S type)은 HRV 단독으로 육계사에 설치 운영할 경우 사용하는 Controller로 통신기능은 없다. SD type은 해빙기능을 가진 HRV, S type은 해빙기능이 없는 HRV용 Controller이다.

사. 폐열회수 환기장치의 풍량 및 열교환효율 실험

육계사용 폐열회수 환기장치의 성능을 결정하는 주된 요소인 풍량과 열교환효율을 측정하는 결과는 다음과 같다.

Fig. 3.5.46. 개발된 육계사용 폐열회수 환기장치의 정압-풍량 특성곡선을 구하기 위해 측정하는 그림이고, Fig. 3.5.47.은 측정결과를 나타내는 그래프이다. 최대 풍량은 3,000CMH이고 설계 풍량 2,500CMH에서는 약 16mmAq의 기외정압을 갖는다. 개발된 육계사용 폐열회수 환기장치를 계사에 설치할 경우 급기 덕트에 의한 압력 손실을 감안하더라도 설계 풍량 2,500CMH를 확보하는데 아무런 문제가 없을 것으로 추정된다. 정압-풍량 곡선이 매우 가파르게 변화함을 고려할 때 기외정압 변동에 대해 급기 풍량의 변화가 둔감하므로 실제 현장 적용시 상황에 따른 급기 풍량의 변화가 매우 적을 것으로 추정된다.

Fig. 3.5.48은 개발된 육계사용 폐열회수 환기장치의 열교환효율을 측정하는 그림이고, Fig. 3.5.49과 Fig. 3.5.50은 열교환효율의 설계값과, 측정값을 비교한 것이다. 여기서의 설계값은 CFD로 분석한 열교환기의 효율과 급배기팬에서 발생하는 발열량을 모두 고려한 열교환효율이다. 이 실험은 CFD로 분석한 열교환기의 효율과 급배기팬에서 발생하는 발열량을 고려한 설계값이 어느 정도 정확도를 가지고 있는지 분석하기 위해 실시하였다.

실험을 위한 공기조건은 실내공기 25℃, 35%, 외기 10℃, 50%로 열교환시 배출공기 유로에서 결로가 발생하지 않는 조건이다.



Fig. 3.5.41 폐열회수 환기장치 1차 모델



Fig. 3.5.42. 폐열회수 환기장치 2차 모델



Fig. 3.5.43 HRV Controller
(M type)

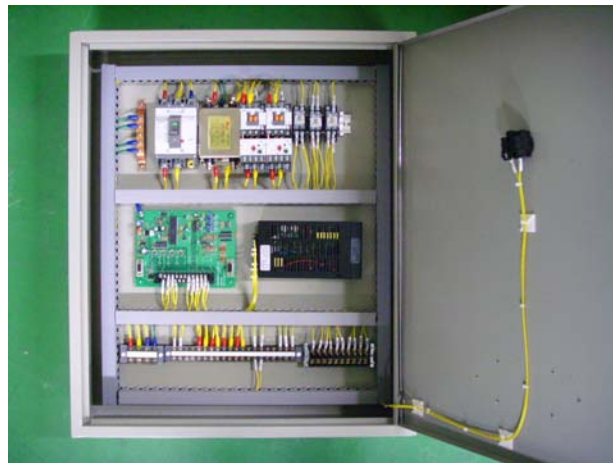


Fig. 3.5.44 HRV Controller(SD type)



Fig. 3.5.45 HRV Controller (S type)



Fig. 3.5.46 HRV의 정압-풍량 특성 실험

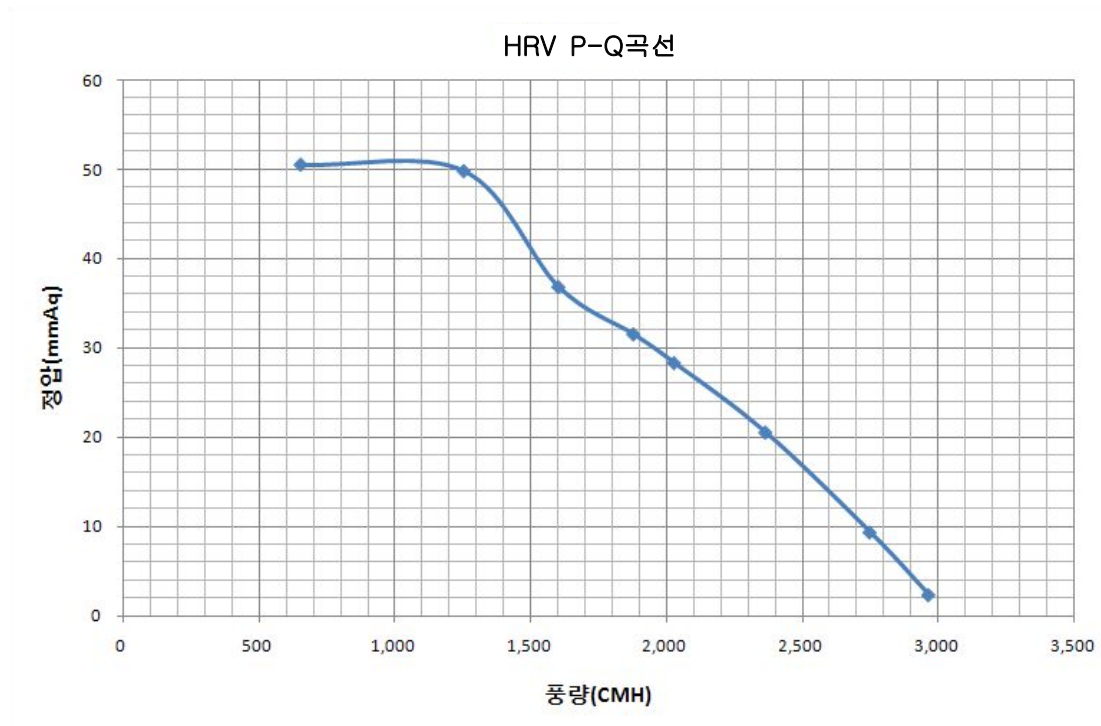


Fig. 3.5.47 HRV의 정압-풍량 곡선



Fig. 3.5.48. HRV의 열교환효율 실험

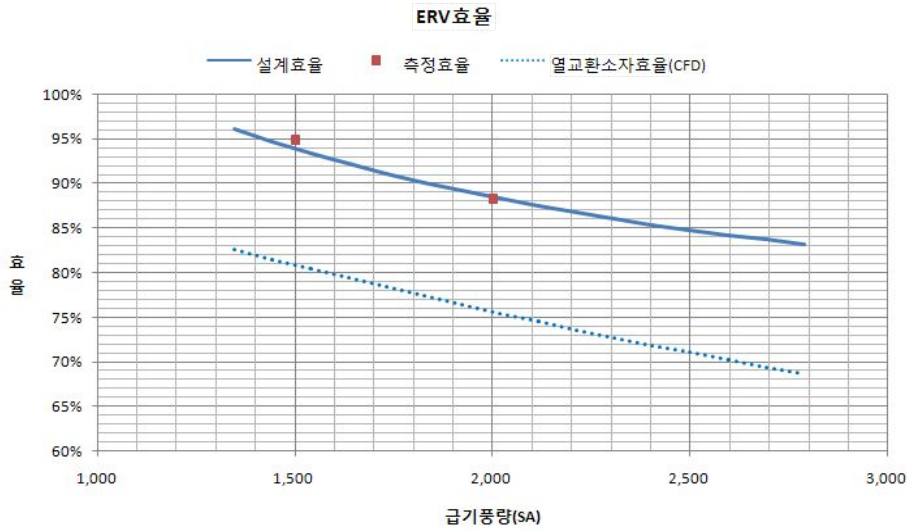
그림에서 측정값은 실험을 통해 측정된 열교환효율이고, 열교환기효율(CFD)은 CFD로 예측한 열교환기의 효율, 설계효율은 팬의 발열량을 추정하여 개발한 폐열 회수 환기장치의 열교환효율을 예측한 값이다. 물론 측정효율이 설계효율에 근접할 수록 설계에 반영한 요소들의 정확도가 높다는 것을 의미한다.

Fig. 3.5.49.은 급배기 풍량비가 0.962(SA/RA = 0.962)상태에서 급기풍량 1,500과 2,000CMH에서 측정된 효율과 급기풍량이 변화하면서 나타나는 설계효율의 추정값을 나타낸 것이다. 측정효율과 추정하는 설계효율이 근접함을 나타내고 있다.

육계사용 폐열회수 환기장치를 현장에 적용할 경우 배기측 공기의 유로 막힘으로 배기풍량이 급기풍량보다 작아지는 경우가 발생할 수 있고, 이 경우에 열교환효율 감소가 예상된다. Fig. 3.5.50.은 급기풍량 2,500CMH, 배기풍량 2,080CMH (SA/RA=1.2)의 조건에서 실험하였고, 설계효율도 이에 준하여 예측하였다. 측정된 효율이 설계효율보다 약 3%정도 높게 나타났다.

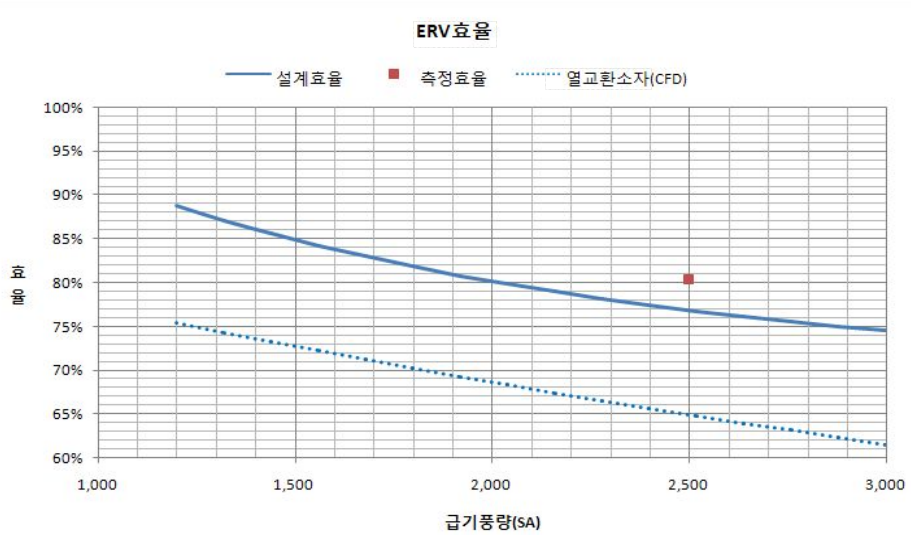
Fig. 3.5.49.와 Fig.3.5.50.에서 팬 발열을 고려한 설계효율이 CFD로 예측한 열교환기의 열교환효율보다 약15%정도 높게 나오는 이유는 실내외 온도차가 15℃ 정도 이므로 팬의 발열에너지가 열교환효율에 미치는 영향이 상대적으로 크기 때문이다.

이상의 결과를 정리하면 결과가 발생되지 않는 공기조건에서는 예측한 설계효율과 측정된 열교환효율이 근접하므로 다른 공기조건이나 풍량 조건에서도 열교환효율을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.



	실내공기(RA)	실외공기(OA)
건구온도(℃)	24.9	9.9
상대습도(%)	34.8%	68.8%
SA/RA 풍량비		
0.962		

Fig. 3.5.49. 결로 미발생 조건에서 풍량별 HRV 효율 특성 (SA/RA=0.962)



	실내공기(RA)	실외공기(OA)
건구온도(℃)	24.9	9.9
상대습도(%)	34.8%	69.4%
SA/RA 풍량비		
1.2		

Fig. 3.5.50. 결로 미발생 조건에서 풍량별 HRV 효율 특성(SA/RA=1.2)

Fig. 3.5.51.은 배출공기에서 결로가 발생하는 공기조건인 실내공기 17℃, 70%, 외기 2℃, 78%에서 풍량 1,500CMH, 급배기 풍량비는 0.967(SA/RA=0.967)로 하였다. 본 과제에서 제시한 효율을 측정하기 위해서는 실내공기 25℃, 70%, 외기 2℃, 78%, 풍량 2,500CMH, 급배기 풍량비는 1.0(SA/RA=1.0)의 조건에서 측정해야 하지만 칼로미터의 용량이 요구조건에 미치지 못해 측정할 수가 없었다. 따라서 이 실험은 결로가 발생하는 공기조건에서 설계효율의 정확도를 점검하기 위해 불가피하게 측정한 것이다. 여기서 설계효율은 팬 발열효과와 결로시 발생하는 응축수의 잠열효과도 모두 반영한 값이다. 측정효율이 설계효율보다 약 1.5%정도 높게 나오는 것을 감안하면 예측한 설계효율이 실제 효율에 매우 근접함을 알 수 있다.

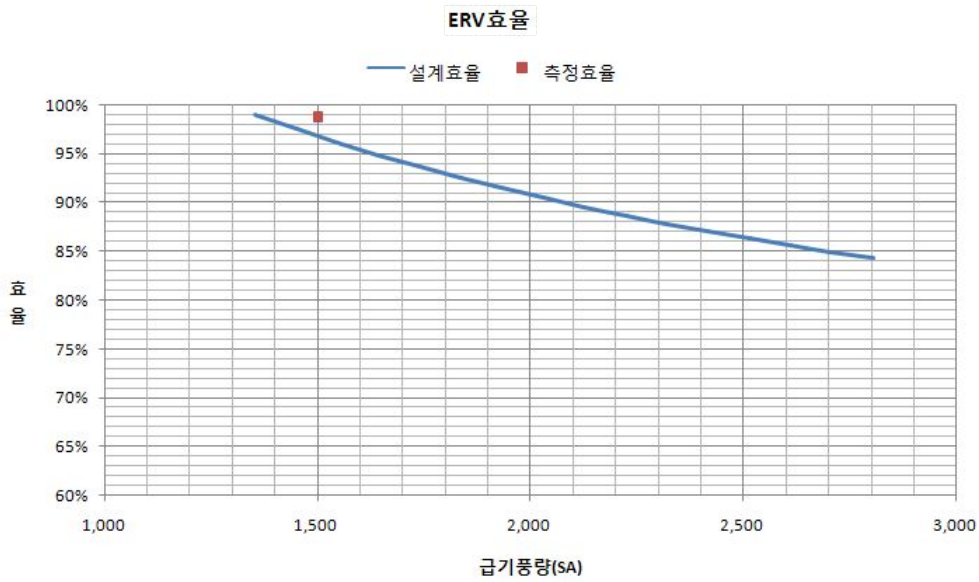
이상 실험결과로 개발된 폐열회수 환기장치 열교환효율은 다음과 같이 예측된다

Fig. 3.5.52.은 실내공기 25℃, 70%, 외기 2℃, 70%에서 급기풍량을 변화시키면서 설계효율을 예측한 것이다. 급배기 풍량비 1.0과 1.25(SA/RA=1.0, SA/RA=1.25) 두 가지 조건에서 급기풍량에 따른 열교환효율을 예측하였다. 급기풍량 2,500CMH에서 SA/RA=1.0인 경우 84.5%, SA/RA=1.25인 경우 81%의 효율이 예측된다. 이것은 본 과제의 목표치인 75%를 충분히 상회하고 있음을 나타내고, 배기측 유로 막힘으로 배기풍량이 2,000CMH까지 감소하더라도 목표 열교환효율 75%이상을 달성하는데 문제가 없음을 나타낸다.

Fig. 3.5.53.과 Fig. 3.5.54.은 급기풍량과 배기풍량을 2,500CMH로 고정하고 여러 가지 실내외 온도별로 개발된 육계사용 폐열회수 환기장치와 사용한 열교환기의 열교환효율을 예측한 것이다. 실내공기 온도는 21, 25, 29, 33℃, 상대습도 70%로 하고, 실외공기는 영하15℃부터 영상15℃까지 변화시키면서 열교환효율을 예측하였다. 실외공기가 낮으면 팬 발열로 인한 폐열회수 환기장치의 열교환효율 증가폭이 감소하지만 잠열에 의한 열교환기의 열교환효율 증가하므로 폐열회수 환기장치의 열교환효율은 외기온도가 영상5℃까지는 85% 근처에서 크게 변화하지 않는다. 영상 5℃를 초과하면 실내외 공기의 온도차 줄어들고 팬의 발열이 열교환효율에 크게 영향을 끼쳐 효율이 급격하게 상승됨을 알 수 있다. 열교환기의 효율은 외기온도가 상승함에 따라 결로에 의한 잠열효과가 줄어들어 효율이 점점 감소하는 것으로 나타난다.

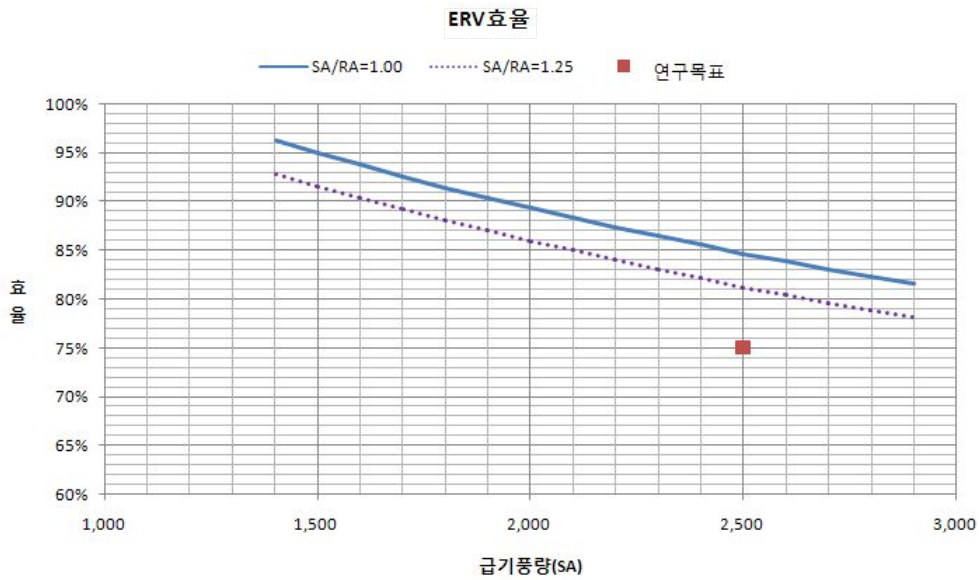
Fig. 3.5.55과 Fig. 3.5.56은 급기풍량 2,500CMH, 배기풍량을 2,000CMH로 고정하여 위와 같이 예측하였다. 이 경우에도 외기온도가 영상10℃ 까지 폐열회수 환기장치의 열교환효율은 80% 근처에서 크게 변화하지 않는다. 영상 10℃를 초과하면 팬의 발열로 인해 열교환효율이 증가한다.

실험하고 예측한 결과로부터 개발된 폐열회수 환기장치는 2,500CMH이상의 환기능력을 가지고 있으며, 실내외 온도 전 구간에 걸쳐 85% 이상의 열교환효율을 가진다. 배출공기 유로가 일부 막혀 배출공기가 감소하더라도 급배기풍량비가 1.25를 초과하지 않으면 80% 이상의 열교환효율 가진다.



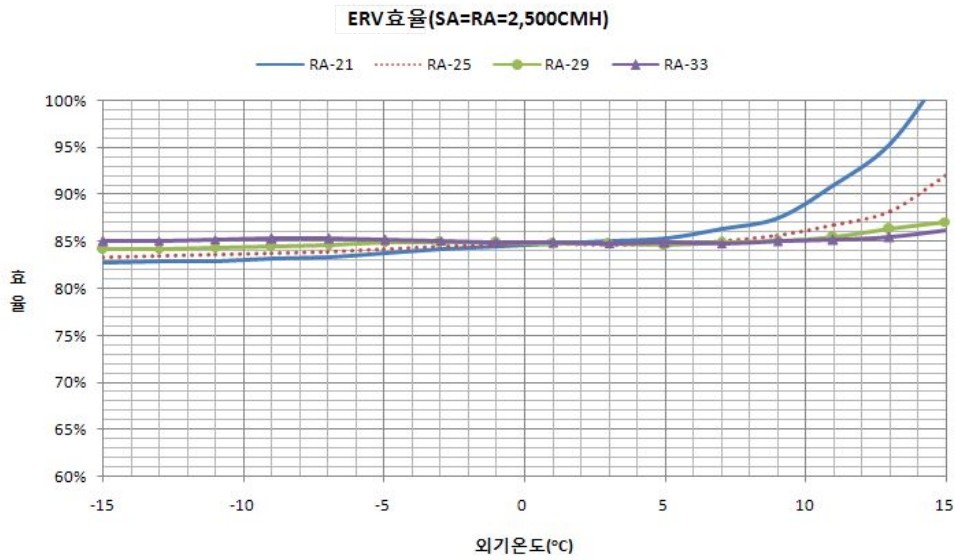
	실내공기(RA)	실외공기(OA)
건구온도	16.9	1.9
상대습도(%)	69.9%	78.1%
SA/RA 풍량비		
0.967		

Fig. 3.5.51. 결로 발생 조건에서 풍량별 HRV 효율 특성 (SA/RA=0.967)



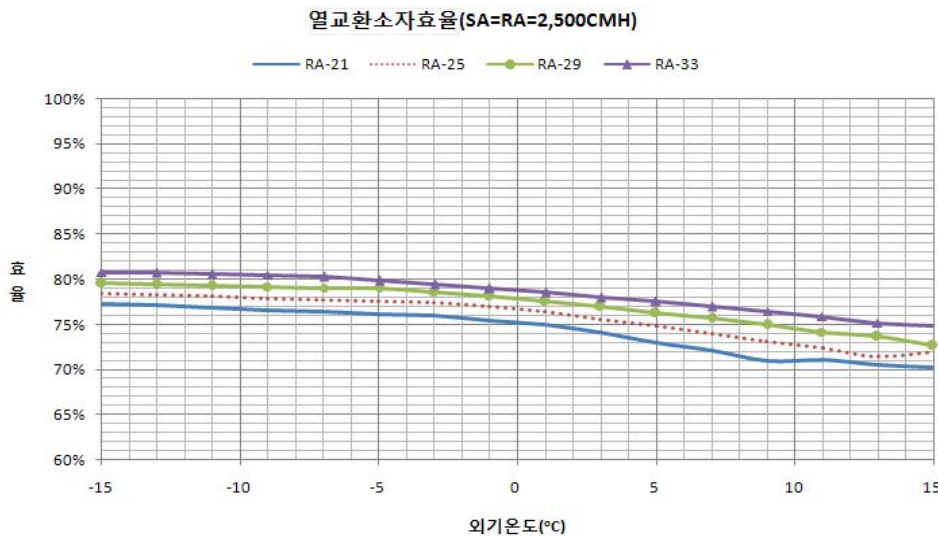
	실내공기(RA)	실외공기(OA)
건구온도(°C)	25	2
상대습도(%)	70%	70%
SA/RA 풍량비		
1, 1.25		

Fig. 3.5.52. 표준 실내외 공기조건에서 풍량별 HRV 효율 특성(설계값)



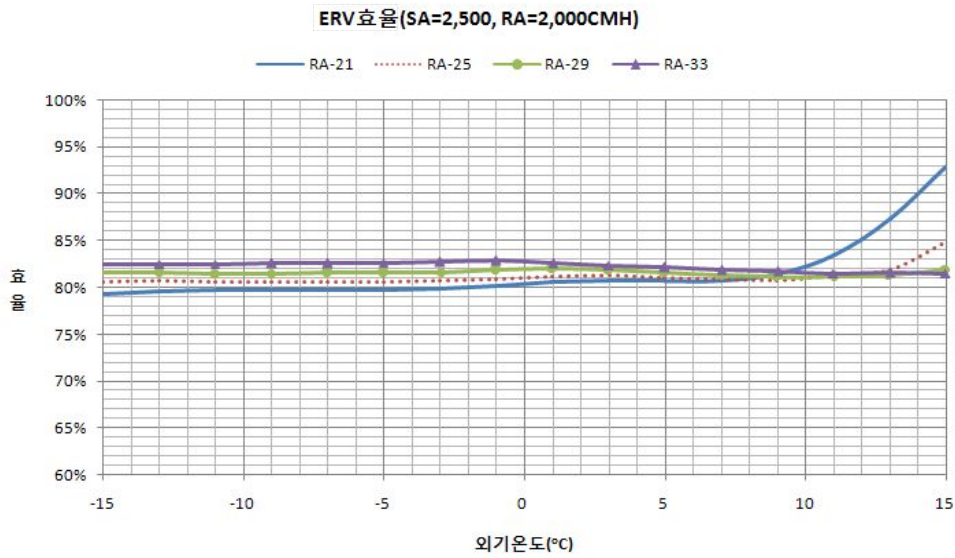
실내공기	건구온도(°C)	RA-21	RA-25	RA-29	RA-33
	상대습도(%)	70			
실외공기	상대습도(%)	50			
풍량	급기(SA)	2,500 CMH			
	배기(RA)	2,500 CMH			

Fig. 3.5.53. 기준풍량에서 공기조건에 따른 HRV효율 특성(설계값)



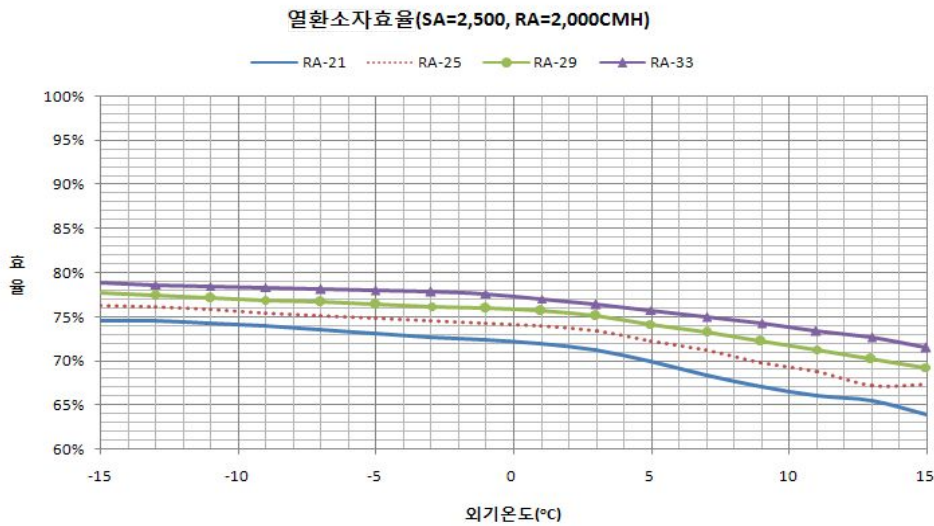
실내공기	건구온도(°C)	RA-21	RA-25	RA-29	RA-33
	상대습도(%)	70			
실외공기	상대습도(%)	50			
풍량	급기(SA)	2,500 CMH			
	배기(RA)	2,500 CMH			

Fig. 3.5.54. 기준풍량에서 공기조건에 따른 열교환기 효율 특성(설계값)



실내공기	건구온도(°C)	RA-21	RA-25	RA-29	RA-33
	상대습도(%)	70			
실외공기	상대습도(%)	50			
풍량	급기(SA)	2,500 CMH			
	배기(RA)	2,000 CMH			

Fig. 3.5.55. 특정 풍량에서 공기조건에 따른 HRV 효율 특성(설계값)



실내공기	건구온도(°C)	RA-21	RA-25	RA-29	RA-33
	상대습도(%)	70			
실외공기	상대습도(%)	50			
풍량	급기(SA)	2,500 CMH			
	배기(RA)	2,000 CMH			

Fig. 3.5.56. 특정 풍량에서 공기조건에 따른 열교환기 효율 특성(설계값)

사. 폐열회수 환기장치의 해빙 및 필터 실험

(1) HRV 필터시스템의 유용성

Fig. 3.5.57.은 HRV의 실내공기 유입 챔버에 설치된 필터시스템과 해빙운전의 효용성을 실험하는 그림이다. 필터시스템의 목적은 배출공기에 포함된 분진이 누적되어 열교환기의 배출공기유로를 막는 현상을 예방하기 위한 것이다. 필터시스템을 운영한 결과 진동모터로 필터에 부착된 먼지를 완벽하게 제거하지는 못했고 3주령이 초과하면 분진이 많이 발생하여 2-3일에 1회씩 수작업으로 필터에 부착된 분진을 제거해야만 했다.

필터를 제거한 후 HRV를 운영한 결과 열교환기의 배출공기 유로에 누적된 먼지의 양은 공기 흐름을 심각하게 방해할 만큼 많지 않았고 HRV의 성능에 큰 영향을 끼치지 않았다. 배출공기 유로에 누적된 분진은 일정 양을 초과하면 공기압에 의해 배출구 쪽으로 빠져나가 분진의 누적이 더 이상 진행되지 않았다. 이런 결과는 열교환기의 배출공기 유로에는 먼지 누적을 촉진시키는 요철 부위를 제거하고, 정전기 발생을 억제할 수 있는 재료를 사용하여 열교환기를 개발한 결과로 여겨진다.

이상의 실험결과로 HRV의 필터시스템은 필요 없고, 연간 1-2회 열교환기의 배출공기 유로를 물 세척하면 분진으로 인한 배출공기 유로의 막힘 현상은 해결될 것으로 판단된다.

(2) HRV 해빙운전

육계사용 HRV의 가장 큰 문제점은 열교환기의 배출공기 유로에 발생하는 결빙현상이다. 육계사 내부의 상대습도는 60%-80%로 매우 습도가 높은 공기이므로 일반 주택이나 빌딩에 사용하는 HRV보다 훨씬 빨리 결빙이 진행된다. 배출공기 유로에 결빙이 발생하면 유로가 좁아져 배출 공기량과 열교환 면적이 점진적으로 감소하고 이로 인해 HRV의 열교환효율이 급격히 감소되며 궁극적으로 배출공기 유로가 차단되어 열교환 환기를 할 수 없게 된다. 이런 경우 급기는 HRV로, 배기는 육계사의 측벽이나 천정의 틈새로 이루어지는 양압식 환기가 된다.

Fig 3.5.58.는 폐열회수 환기장치 1차 모델에서 열교환기의 배기 쪽에서 발생한 결빙상태를 보여주고 있다. 이런 정도의 결빙이 발생하면 HRV의 열교환효율이 50%이하로 감소된다.

1차년도에 개발한 HRV는 이런 결빙 문제를 해결하기 위해 HRV에 Fig. 3.5.38.과 같은 해빙유로1의 방법을 사용하여 해빙기능을 부여하였다. HRV가 해빙모드로 진입할 조건이 되면 Fig. 3.5.41.의 유로선택 댐퍼를 열어서 운전하면 급기 유로가 변환되어 열교환기를 거치지 않고 계사내부로 공급되고, 배기는 유로변환 없이 열교환기를 거쳐 배출되도록 하였다. 이것은 열교환을 하지 않고 외부로 유출되는 배출공기 열량으로 해빙하는 방법이다.

열교환기 배출공기 유로에 결빙이 발생하여 열교환 효율이 60%로 감소하면 해빙

환기를 시작하고 30분 후 정상환기로 복귀하는 방법으로 열교환기를 해빙하였다. 외기온도가 낮은 경우 HRV는 해빙환기, 정상환기를 반복하게 된다. 이때 HRV의 실내공기 유입 챔버의 내부 압력은 배출공기 유로 막힘의 정도에 따라 변화한다.

Fig. 3.5.59.는 실내공기 유입 챔버에 설치한 압력센서로 부터 측정된 압력변화와 외기온도를 나타내고 있다. 결빙이 발생하지 않은 경우 내부 압력은 30mmAq를 초과하지 않음에도 불구하고 해빙환기 완료 후에도 내부 압력이 30mmAq이하로 감소하지 않는 것을 고려하면 해빙환기 후에도 완전한 해빙이 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 외기온도와 압력 그래프를 비교 검토하면 외기가 영하 10도 일때 보다 영하 20도에서 결빙 속도가 점점 증가하여 해빙환기 완료 후 내부 압력이 점점 높아지는 것을 알 수 있다. 외기가 영하 20도에 도달하면 HRV의 전체 환기시간 중 해빙환기가 차지하는 비중이 50%정도 된다. 즉 이것은 열교환 환기장치로서 HRV의 사용률이 50%라는 것을 의미하고 육계사 복합 환기시스템을 적용한 육계사의 난방 에너지 절감율에 매우 부정적인 영향을 끼친다.

HRV가 Fig. 3.5.38.과 같은 해빙유로1 방법의 해빙환기는 환기효율에 영향을 주지 않고 양방향 환기를 할 수 있는 장점이 있으나 해빙환기시 완벽한 해빙이 되지 않고 해빙환기 시간이 길어 전체적인 열교환효율이 감소하는 문제가 있다.

2차년도에는 이런 문제를 보완하기 위해 Fig. 3.5.39.과 같은 해빙유로2 방법으로 해빙운전하는 2차 모델 HRV를 개발하여 실험하였다. 열교환효율 70%에서 해빙운전, 60%에서는 점점운전을 하고 해빙운전 30분 후 정상운전으로 복귀하도록 하였다. Fig. 3.5.60.은 3대의 HRV를 설치한 육계사 복합 환기시스템에서 각 HRV의 해빙운전 상태와 외기온도를 나타내고 있다.

09:00부터 다음날 09:00까지 24시간 동안 HRV1은 6회, HRV2와 HRV3는 각각 3회의 해빙운전을 하였고, 야간운전 시간인 18:00부터 다음날 06:00까지 12시간 동안 HRV1은 4회, HRV2와 HRV3는 각각 2회의 해빙운전을 하였다. 1차 모델에서 10회의 해빙운전을 한 것과 비교하면 현저히 감소하였다. 이것은 해빙운전 중 열교환기가 완전히 해빙하였음을 나타낸다. 그림에서 HRV2의 해빙운전 대기는 HRV1이 해빙운전을 종료한 해빙운전에 진입하기 위해 대기 중인 것을 나타낸다. 2차 모델 HRV에서 해빙운전시 배기만 되고 급기가 되지 않는 음압식 환기가 되므로 설치된 HRV가 동시에 해빙운전하지 않도록 환기시스템을 설계하였기 때문이다.

1차, 2차 모델 HRV의 열교환효율은 동일하지만 1차 모델 HRV를 적용한 육계사 복합 환기시스템으로 실험한 1회차 에서는 난방에너지 절감율이 53.2%에 불과하였지만 2차 모델 HRV를 적용하여 실험한 6회차 에서는 63.5%의 난방에너지 절감율을 달성하였다. 이것은 1차 모델을 적용한 복합 환기시스템에서는 HRV의 빈번한 해빙운전으로 환기시스템의 전체적인 열교환효율을 감소시켰기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 해빙유로2를 적용한 HRV를 최종 개발제품으로 하였다.

아. 폐열회수 환기장치의 풍량 제어 댐퍼

Fig. 3.5.42.의 2차 모델 HRV에서 HRV 환기량을 강,약 2단으로 제어하기 위해 실내공기(RA) 유입구와 급기(SA) 유출구에 풍량제어댐퍼를 설치하였다. HRV 환기량은 풍량제어댐퍼 ON시에는 3,000CMH, OFF에는 1,500CMH이다. HRV가 담당하는 환기량이 1,500CMH 이하인 경우에는 풍량제어댐퍼 OFF상태에서 HRV의 팬을 ON/OFF, 환기량이 1,500-3,000인 경우 HRV의 팬은 ON 상태로 유지하고 풍량제어댐퍼를 ON/OFF하는 방법으로 HRV의 환기량을 제어하였다. 식(34)는 HRV 환기량이 1,500CMH미만일 경우 팬의 ON, OFF시간, 식(35)는 환기량이 1,500-3,000인 경우 풍량제어댐퍼의 ON, OFF시간을 나타낸다.

$$H_{ON} = \frac{Q_H}{1500} P_H, \quad H_{OFF} = P_H - H_{ON} \quad (33)$$

$$D_{ON} = \left(\frac{Q_H}{1500} - 1\right) P_D, \quad D_{OFF} = P_D - D_{ON} \quad (34)$$

여기서

Q_H : HRV의 환기량(CMH)

H_{ON}, H_{OFF}, P_H : HRV의 ON, OFF, 주기 시간

D_{ON}, D_{OFF}, P_D : 풍량제어댐퍼의 ON, OFF, 주기 시간

강, 약 2단 제어는 HRV의 급배기 팬을 ON/OFF 제어하는 빈도수를 감소시키고, 3,000CMH보다 약 10% 더 높은 열교환효율을 가진 1,500CMH 풍량을 활용할 수 있고, 환기량 1,500CMH이상에서는 HRV를 OFF시키지 않으므로 HRV의 ON/OFF에 따른 열교환효율 감소 문제를 제거할 수 있어 HRV를 더욱더 효과적으로 사용할 수 있게 되었다.

자. 현열/전열 육계사 폐열회수 환기장치

전열교환기는 배출공기와 공급공기사이의 수분교환으로 현열뿐만 아니라 잠열교환도 이루어지는 열교환기이다. 대부분의 전열교환 환기장치를 생산하는 업체는 이미 상용화된 전열교환기를 사용한다. 본 연구에서도 전열교환 환기장치를 생산하는 업체가 많이 사용하고 있는 M사의 전열교환기의 성능을 평가하여 향후 개발된 육계사용 폐열회수환기 장치에 부착하여 사용하고자 한다.

Fig. 3.5.61은 M사의 전열교환기의 성능을 평가하기 위해 제작한 소형 전열교환 환기장치이다. 실험에 사용한 전열교환기 사이즈는 300*300*300mm이고 골 높이가 2mm인 직교류형 전열기이다. Table 3.5.5는 현열교환효율과 잠열(습도)교환 효율을 측정하기 위해 측정한 실내공기(RA), 외기(OA), 급기(SA)의 건구온도와 습구온도를 풍량별로 나타낸 것이다.

Table 3.5.5 전열교환기 성능 측정 결과

	풍량 (CMH)	RA		OA		SA	
		건구온도 (°C)	습구온도 (°C)	건구온도 (°C)	습구온도 (°C)	습구온도 (°C)	습구온도 (°C)
1	160	22.05	13.92	2.06	0.44	18.56	11.14
2	220	22.04	13.91	2.07	0.42	18.04	10.73
3	260	22.04	13.91	2.04	0.42	17.67	10.44
4	304	22.04	13.91	2.05	0.43	17.32	10.19
5	352	22.05	13.93	2.06	0.42	17.00	9.92

전열교환기의 효율은 사용되는 재질과 유로의 형태가 결정되면 전열교환기의 체적과 사용하는 풍량의 상관관계에 의해 결정된다. Fig. 3.5.62, Fig. 3.5.63은 측정된 현열(온도)교환효율, 잠열(습도)교환효율과 전열교환기의 체적과 사용하는 풍량의 비(체적/풍량)사이의 관계를 나타내는 그래프이다.

육계사에서 전열교환이 필요한 시기는 입추 후 1-5일령사이로 환기량은 1,000-2,000CMH이므로 1,500CMH의 풍량에 필요한 직교류형 전열교환기의 치수와 습도교환효율의 관계는 Table 3.5.6과 같이 예측된다.

Table 3.5.6 잠열교환효율과 열교환소자 치수(풍량:1,500CMH)

	잠열(습도)교환효율(%)	열교환소자 치수(mm)
1	35	□ 450
2	40	□ 480
3	45	□ 520
4	50	□ 570
5	55	□ 620
6	60	□ 680



Fig3.5.57 실험중 HRV



Fig3.5.58 열교환소자 결빙 상태

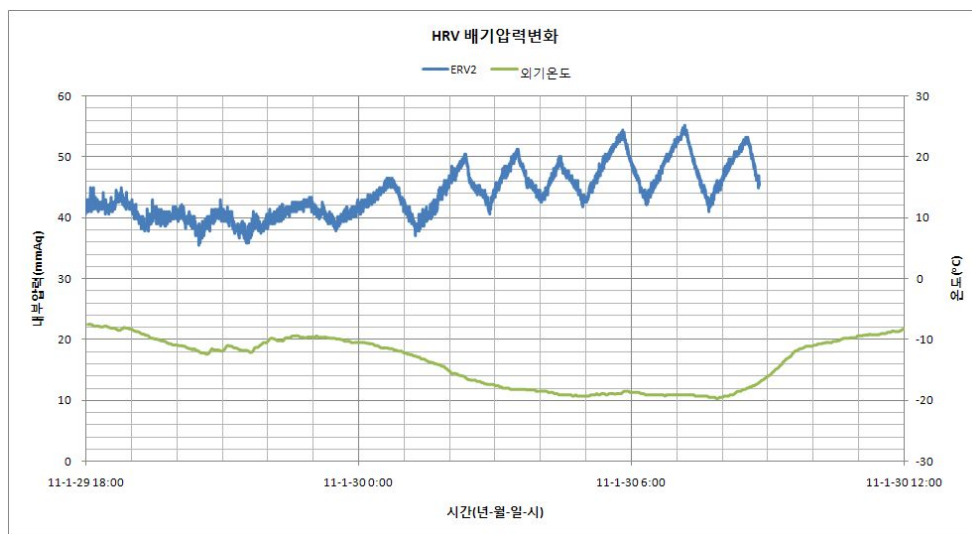


Fig3.5.59 HRV의 실내공기 유입 챔버 압력변화(1차 모델 HRV)

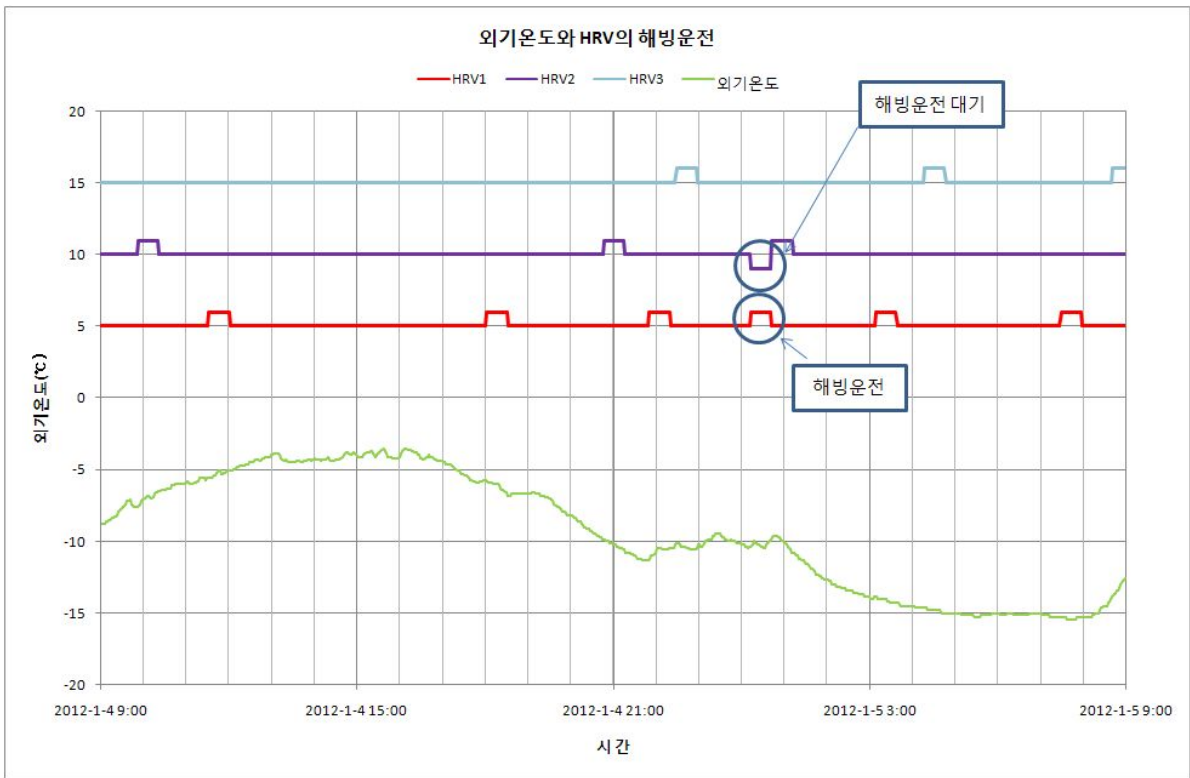


Fig. 3.5.60. 외기온도와 해빙운전(2차 모델 HRV)

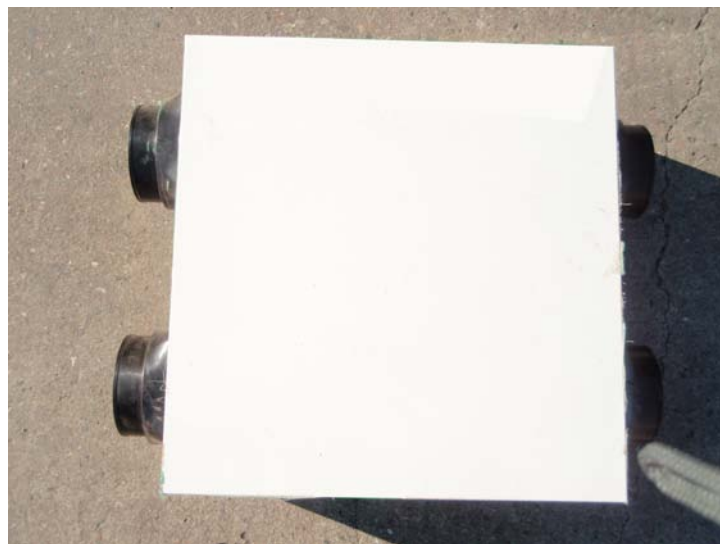


Fig 3.5.61. 실험용 전열교환기

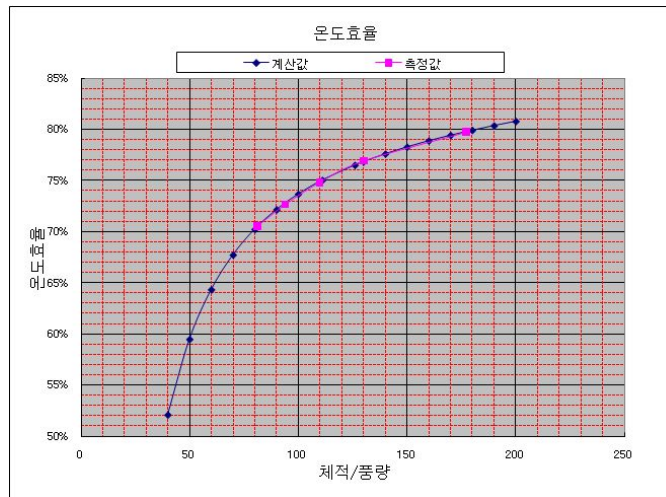


Fig. 3.5.2032 현열(온도)교환 효율

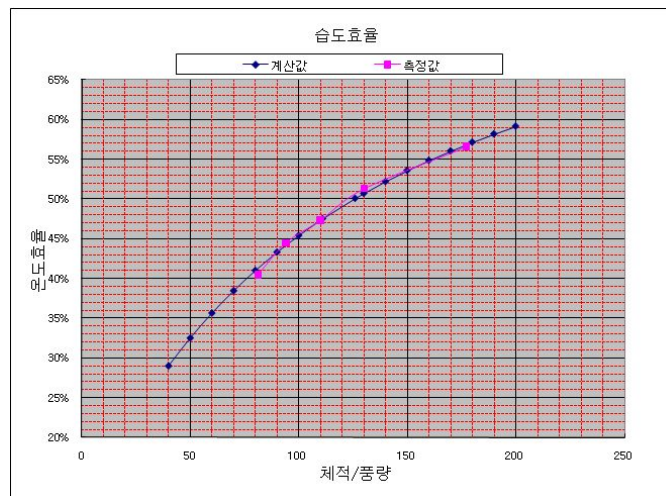


Fig. 3.5.63 잠열(습도)교환 효율

차. 폐열회수 환기장치의 개발 결과

본 연구에서 개방형 계사 및 무장계사의 현황을 파악하였고 이를 토대로 기존 기계식 환기장치와 연계할 수 있고, 육계사의 실내외 공기조건에 능동적으로 대응할 수 있는 폐열회수 환기장치를 개발하였다. 연구개발 목표인 환기풍량 2,500CMH에서 열교환효율 75%(실내공기 건구온도25℃, 상대습도70%, 외기 건구온도2℃) 이상을 초과하여, 환기풍량 3,000CMH에서 열교환효율은 75%이상을 달성하였다. 급배기 풍량이 3,000CMH로 동일할 경우 육계사에서 발생하는 모든 실내외 공기조건에서 80%의 열교환효율을 달성하였으며, 사용 중에 결빙등의 유로 막힘으로 발생할 수 있는 동일하지 않는 급배기 풍량(급배기 풍량비=1.25, 급기 2,500CMH, 배기 2,000CMH)에서도 80%의 열교환효율을 달성하였다.

육계사 내부의 암모니아와 같은 유해성 가스에 영향을 받지 않도록 화학적으로 안정된 PP를 재질로 대항류형 열교환기를 개발하였고, 육계사 내부 공기에 포함된 부유먼지와 결로시 발생하는 응축수가 효율적으로 제될 수 있는 구조로 설계하였다. 결로가 발생되지 않는 공기조건에서 열교환기의 열교환효율 70%, 결로가 발생하는 공기 조건에서는 최대 80%의 열교환기의 열교환효율을 가진다(환기풍량 2,500CMH). 저렴한 PP로 열교환소자를 개발하였으므로 알루미늄 재질의 수입 열교환소자에 보다 가격 경쟁력이 있어 향후 폐열회수형 환기장치의 육계사 농가 보급에 크게 도움이 될 것으로 생각된다.

HRV의 배출공기에 포함된 분진을 제거하기 위해 자동세정 필터시스템을 개발하여 설치하였다. 필터시스템의 유용성을 검증하기 위해 필터시스템을 설치한 상태와 제거한 상태에서 HRV를 운영하여 배출공기 유로 막힘 현상을 비교, 검토한 결과 양쪽 모두 유로 막힘 현상이 발생하지 않았다. 이것은 열교환기 설계시 유로 막힘 현상을 예방할 수 있도록 열교환기의 재질과 유로 구조를 적절하게 선택한 결과로 생각된다. 따라서 본 연구에서 개발한 열교환기를 사용할 경우 별도의 자동세정 필터시스템은 필요하지 않고 주기적으로 열교환기의 배출공기 유로를 물 세척하면 될 것으로 판단된다. (세척주기 : 1회 육계사육 후, 35일 사용)

HRV에 해빙운전에서 해빙시작 기준지표로 열교환효율을 제시하였다. HRV에 실내공기(RA), 외기(OA), 급기(SA)의 온도를 측정할 수 있는 온도센서를 설치하여 정상운전 중 측정된 온도로 열교환효율을 계산, 해빙운전 시점을 결정하였다. 외기(OA)온도 또는 외기(OA)온도와 급기(SA)온도만 측정하여 결빙을 예측하고 해빙하는 기존의 방법보다 해빙운전 시간을 감소할 수 있었다. 음압/양압식 방법을 채택한 본 연구의 폐열회수 장치를 위해 해빙을 위한 실내공기가 실내공기 유입 챔버, 외기 유입 챔버, 열교환기 공급공기 유로, 급기 유출 챔버를 거쳐 실내로 재유입하는 방법으로 열교환기의 해빙시간을 단축하는 결과를 얻었다.

HRV를 강/약 2단으로 운전하기 위해 도입된 풍량제어댐퍼는 환기량에 따라 HRV를 ON/OFF운전해야 되는 비효율성을 제거하였고, HRV가 담당할 풍량을 더욱더 세분화하였다.

제 6 절 폐열회수 환기장치를 이용한 육계사 환기시스템

1. 육계사 복합 환기시스템 A

기존 육계사의 음압식 환기시스템은 3분 주기로 배기팬을 ON/OFF 하여 환기한다. 배기팬의 최대 풍량이 30,000CMH이고 필요한 환기량이 10,000CMH인 경우 배기팬의 ON 시간 1분, OFF 시간 2분인 3분주기를 반복하여 필요 환기량을 확보한다. 배기팬이 작동하면 실내공기는 외부로 유출되고 외기는 육계사 측벽에 설치된 급기구를 통해 유입된다. 동절기에는 급기구를 통해 유입된 외기는 급속히 계군위치로 하강하고 필요 환기량이 많아 배기팬의 ON 시간이 긴 경우 계군 위치의 공기 온도가 열적균형성을 상실하게 되고 이것이 호흡기 질환의 주된 원인이 된다. ‘폐열회수 환기장치를 이용한 육계사 복합 환기시스템 A’는 환기로 인해 발생하는 난방 에너지를 절감하고, 환기시 계군 위치의 열적균일성을 향상하기 위해 육계사에 HRV 뿐만 아니라 내분순환 겸용 SED 급기팬, SED 배기팬을 별도로 설치한 환기시스템이다.

아래의 Table 3.6.1은 “육계사 복합 환기시스템 A”를 구성하는 장비 목록 및 성능을 나타내고 있고, Fig. 3.6.1은 개념도이다..(사육수수 : 20,000 - 25,000수 기준)

Table 3.6.1 육계사 복합 환기시스템 A

	수량	비고
HRV	3	풍량 : 3,000CMH/개, 열교환효율 : 80%
SED 급기팬	3	풍량 : 7,200CMH/개, 급기, 내부순환 겸용
SED 배기팬	6	풍량 : 3,600CMH/개
배기팬	1	풍량 : 30,000CMH/개, 기존 계사의 배기팬
HRV DUCT	3	HRV의 급기용 Duct
급기팬 DUCT	3	급기팬 급기, 내부순환공기용 Duct
중앙제어장치	1	복합 환기시스템 제어

HRV는 급기와 배기를 동시에 하는 열교환 환기장치로 육계사 외부의 한쪽 측면에 3대를 설치하였다.(Fig. 3.6.9). SED 급기팬(Fig. 3.6.5.)은 외부공기를 유입하거나 내부공기를 순환하기 위해 사용되고, SED 배기팬은 SED 급기팬이 외부공기를 유입하는 급기모드로 운전할 때 작동하여 내부공기를 외부로 배출하고, SED 급기팬이 내부공기를 순환하기 위한 순환모드로 작동될 경우 운전을 중지한다. 즉 내부순환 겸용 SED 급기팬과 SED 배기팬은 연동하여 운전하는 하나의 장치로 본 연구에서는 SED(Supply and Exhaust Device)로 칭한다.

배기팬은 환기량이 HRV와 SED 급기팬의 총 풍량을 초과할 경우 사용되는 팬으로 기존 육계사에 설치되어 있는 배기팬이다. 실험할 육계사는 측벽에 설치되어 있

는 최대 풍량 5,600CMH인 5개의 크로스팬을 배기팬으로 하였다.

HRV와 SED 급기팬을 통해 육계사로 유입되는 공기는 각각의 Duct를 통해 육계사 내부로 이송되고, Duct의 급기구멍을 통해 계사로 공급된다. HRV용 Duct는 HRV가 설치된 측벽의 반대쪽 측벽 상부에 위치하고 있으며 급기구멍은 HRV를 통해 유입되는 급기가 계사바닥과 평행한 방향으로 유입되도록 하였다.(Fig. 3.6.2., Fig. 3.6.4.) SED 급기팬용 Duct는 육계사 중앙 천정에 위치하고 있으며.(Fig. 3.6.2.) 급기구멍은 계사바닥과 수평 방향이고 Duct 양쪽에 있다.

Fig. 3.6.3.은 이 환기시스템의 중앙제어 장치이다. 사용자는 중앙제어장치를 통해 육계사의 환기량, 온도, 온도허용범위를 설정하고, HRV의 ON/OFF 주기, SED ON/OFF주기, 배기팬 ON/OFF주기를 설정한다. 육계사의 현재 환기량, 현재 온도를 출력하고, 환기시스템을 구성하는 기기에 고장이 발생하거나 육계사 내부 온도가 설정된 허용범위를 벗어나면 사용자에게 통보한다. 입추 초기에 육계사를 부분적으로 사용하는 농가를 위해 부분육추/전체육추를 선택할 수 있는 선택스위치가 있고 부분육추시 사용할 수 없는 환기장치는 배제한 후 사용할 수 있도록 하였다.

중앙제어 장치의 주된 기능은 사용자가 설정한 환기량, 각 환기장치의 주기를 기준으로 환기시스템을 운영하는 것이다. Table 3.6.2는 사용자가 설정한 환기량을 기준으로 환기시스템의 각 환기장치에 환기량을 배정하는 운영하는 방법을 나타내고 있다.

Table 3.6.2. 설정 환기량에 따른 각 환기장치의 환기량

설정 환기량(Q)	HRV1	HRV2	HRV3	SED	배기팬
3,000이하	Q	0	0	0	0
3,000 - 6,000	0	$\frac{Q}{2}$	$\frac{Q}{2}$	0	0
6,000 - 9,000	Q-6,000	3,000	3,000	0	0
9,000 - 30,600	3,000	3,000	3,000	Q-9,000	0
30,600이상	3,000	3,000	3,000	21,600	Q-30,600

각 환기장치(HRV, SED, 배기팬)에 환기량이 배정되면 사용자가 입력한 ON/OFF주기를 기준으로 식(33), (34)와 같은 방법으로 환기장치를 운영한다. SED의 환기량이 “0”인 경우와 “0”이상의 환기량이 되어 ON/OFF운전을 할 경우에도 OFF 시간에는 SED 급기팬은 내부순환 모드로 운영되고 SED 배기팬은 작동을 중지한다.

각 HRV는 해빙운전 조건이 발생할 경우 중앙제어장치에 통보하여 해빙운전을 명령받고 해빙운전을 시작하며, 중앙제어장치는 HRV가 동시에 해빙운전 할 수 없도록 통제한다.

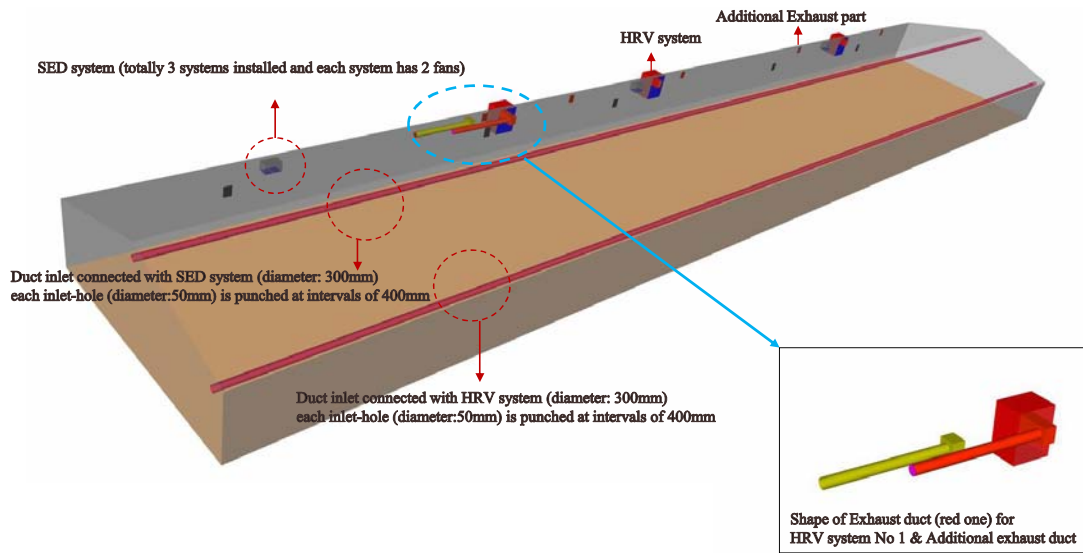


Fig. 3.6.1. HRV를 이용한 육계사 복합 환기시스템 A설치 육계사



Fig. 3.6.2.



Fig. 3.6.3. 중앙제어장치



Fig. 3.6.4. HRV DUCT 급기구명



Fig. 3.6.5. 급기팬 설치도

2. 육계사 복합 환기시스템 B

3분 주기로 배기팬을 ON/OFF하여 환기하는 기존 육계사의 음압식 환기시스템의 문제점은 전술한 바와 같이 동절기에 주기가 너무 길고 환기량이 많은 경우 계군 위치에서 열적균형성이 상실되는 것이다. 폐열회수 환기장치를 이용한 육계사 복합 환기시스템에서는 HRV가 동절기에 필요한 환기량의 1/2이상을 담당하고 있으므로 배기팬이 담당하는 환기량이 상대적으로 적기 때문에 배기팬의 ON/OFF 주기를 짧게 하면 계군위치의 열적균형성을 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 범위로 유지할 수 있는 해석결과를 바탕으로 “육계사 복합 환기시스템 B”를 설계하였다. ‘육계사 복합 환기시스템 A’와 큰 차이점은 육계사 내부온도 상승으로 외기냉방이 필요한 경우 계사내부의 온도변화를 기준으로 외기냉방에 필요한 환기량을 계산하여 환기하는 것이다.

아래의 Table 3.6.3은 “육계사 복합 환기시스템 B”를 구성하는 장비 목록 및 성능을 나타내고 있고, Fig. 3.6.7은 개념도이다.(사육수수 : 20,000 - 25,000수 기준)

Table 3.6.3 육계사 복합 환기시스템 B

	수량	비고
HRV	3	풍량 : 3,000CMH/개, 열교환효율 : 80%
환기용 배기팬	1	풍량 : 30,000CMH/개, 기존 계사의 배기팬
냉방용 배기팬 1	1	풍량 : 30,000CMH/개, 기존 계사의 배기팬
냉방용 배기팬 2	2	풍량 : 30,000CMH/개, 기존 계사의 배기팬
냉방용 배기팬 3	4	풍량 : 30,000CMH/개, 기존 계사의 배기팬
HRV DUCT	3	HRV의 급기용 Duct
중앙제어장치	1	복합 환기시스템 제어
온도센서	4	육계사 내부 온도측정

HRV는 급기와 배기를 동시에 하는 열교환 환기장치로 육계사 외부의 한쪽 측면에 3대를 설치하였다.(Fig. 3.6.9.). 환기용 배기팬은 환기량이 HRV의 총 풍량을 초과할 경우 사용되는 팬으로 기존 육계사에 설치되어 있는 배기팬이다. 실험할 육계사는 측벽에 설치되어 있는 최대 풍량 5,600CMH인 5개의 크로스팬을 환기용 배기팬으로 하였다. 냉방용 배기팬 1, 2, 3은 외기냉방을 위해 필요 환기량이 증가하여 환기용 배기팬의 최대 풍량을 초과할 경우 사용한다.

HRV용 Duct는 Duct는 육계사 중앙 천정에 위치하고 있으며 급기구멍은 계사바닥과 수평 방향이고 HRV가 설치된 측벽의 반대쪽으로 향하고 있다. HRV2용 Duct는 계사 전 구간, HRV1,3용 Duct는 각각 계사 1/2 구간에 걸쳐 설치되어 있다.

Fig. 3.6.8.은 이 환기시스템의 중앙제어 장치로 기본적인 기능은 ‘육계사 복합 환기시스템 A’와 동일하지만 육계사 내부에 설치된 4개의 온도센서를 이용하여 외기냉방을 하는 기능이 있다. 육계사 내부 온도가 상승하여 외기냉방이 필요하다면 환기

량을 증가시킬 필요가 있고 이때 필요한 환기량이 환기용 배기팬의 최대 풍량을 초과하면 냉방용 배기팬 1,2,3이 필요하게 된다.

Table 3.6.4.는 사용자가 설정한 환기량을 기준으로 환기시스템의 각 환기장치에 환기량을 배정하는 운영하는 방법을 나타내고 있다. 여기서 필요 환기량은 사용자가 설정한 설정 환기량 또는 외기냉방을 위해 중앙제어 장치가 계산한 환기량이다.

Table 3.6.4. 필요 환기량에 따른 각 환기장치의 환기량

필요 환기량 (Q)	HRV1	HRV2	HRV3	환기용 배기팬	냉방용 배기팬1	냉방용 배기팬2	냉방용 배기팬3
3,000이하	0	Q	0	0	0	0	0
3,000-6,000	$\frac{Q}{2}$	0	$\frac{Q}{2}$	0	0	0	0
6,000 - 9,000	3,000	$Q-6,000$	3,000	0	0	0	0
9,000 - 30,000	3,000	3,000	3,000	$Q-9,000$	0	0	0
30,000-60,000	0	0	0	$Q-30,000$	30,000	0	0
60,000-90,000	0	0	0	$Q-60,000$	0	60,000	0
90,000-120,000	0	0	0	$Q-90,000$	30,000	60,000	0
120,000-150,000	0	0	0	$Q-120,000$	0	0	120,000
150,000-180,000	0	0	0	$Q-150,000$	30,000	0	120,000
180,000-210,000	0	0	0	$Q-180,000$	0	60,000	120,000
210,000-240,000	0	0	0	$Q-210,000$	30,000	60,000	120,000
240,000이상	0	0	0	30,000	30,000	60,000	120,000

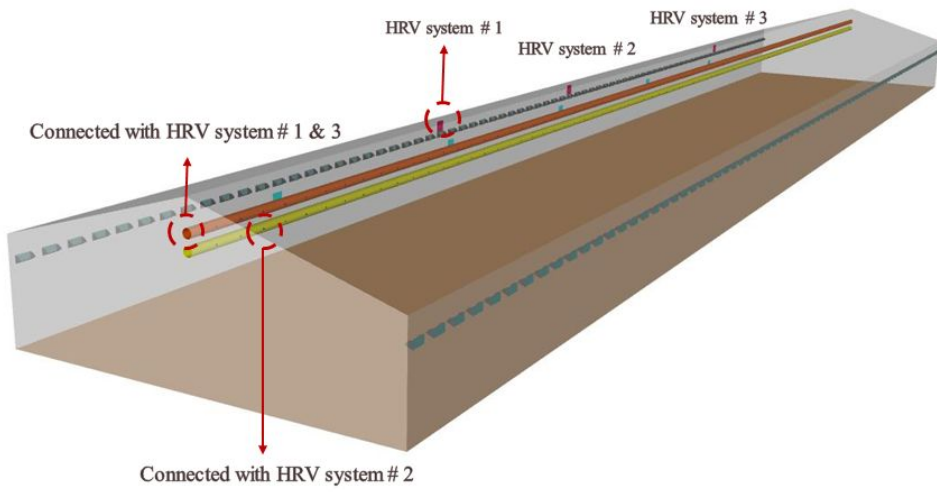


Fig. 3.6.7. HRV 설치 육계사



Fig. 3.6.8. 중앙제어장치 B



Fig. 3.6.9. HRV 설치도

제 7 절 육계사 복합 환기시스템의 현장 실험

1. 서론

본 연구에서 개발된 폐열회수 환기장치와 이를 이용한 육계사 복합 환기시스템을 실험하였다. 충북 음성군에 위치한 농가에서는 폐열회수 환기장치를 이용한 육계사 육계사 복합 환기시스템을 실험하였고 미국 South Carolina의 Summerton에 위치한 농가에서는 단순히 폐열회수 환기장치(HRV)만 설치하여 실험하였다.

충북 음성군 농가는 약 22,000수 사육 가능한 무창계사 2동을 운영하고 있다. 1회 사육일수는 35일로 년 6회 사육하며 평균 출하 중량은 약 1.5 - 2.0kg이다. 사계절이 뚜렷한 한국에서 비교적 추운 지방에 위치해 있으므로 동절기에는 난방에너지가 많이 소모되며 호흡기질환이 빈번히 발생하는 장소이다. 육계사 복합 환기시스템이 난방에너지에 미치는 영향을 분석하고 동절기와 환절기에 자주 발생하는 호흡기 질환을 예방하기 위해 제안한 환기시스템 운영방안과 점진적 외기냉방의 효율성을 확인하기 위해 실험하였다.

South Carolina의 Summerton 농가는 20,000수 사육 가능한 무창계사 16동을 운영하고 있다. 1회 사육일수는 60일이고 년 5회 사육하며 평균 출하 중량은 8lb이다. 이 지역은 겨울철에도 영하로 내려가는 경우가 거의 없어 난방에너지 사용량이 적고 호흡기 질환이 거의 발생하지 않는다. 따라서 육계사 복합 환기시스템보다는 HRV만 설치하여 HRV가 난방에너지에 미치는 영향과 경제성을 분석하기 위해 실험하였다.

2. 충북 음성군 육계농가 실험

가. 실험장치 개요

Fig.3.7.1.은 본 연구에서 개발한 폐열회수 환기장치를 이용한 육계사 환기시스템을 실험한 곳이다. 개발된 환기시스템이 난방에너지 절감에 미치는 영향을 분석하기 위해 실험동에는 개발한 환기시스템, 비교동에는 기존의 환기시스템을 사용하여 운영하였다. 각 육계사의 난방에너지 소비량을 측정하기 위해 육계사별로 Fig. 3.7.2.와 같이 로드셀이 부착된 1,000리터 용량의 연료탱크를 계사외부에 설치하였고 에너지 사용량을 실시간 측정하기 위해 로드셀용 데이터로거(Fig. 3.7.3.)를 관리실에 설치하였다. 난방용 히터로 각 육계사에 백등유를 에너지로 사용하는 4대의 열풍기를 설치하였다. 계사 내부와 외부 공기의 온습도를 측정하고 기록하기 위해 육계사별로 3대, 외부에 설치된 백엽상에 1대 총 7대의 Digital 온습도계를 설치하여 공기의 온도, 습도를 측정하고 기록하였다.

Fig. 3.7.4.와 Fig.3.7.5.는 각각 기존 환기시스템을 적용한 비교동과 개발된 환기시스템을 적용한 실험동의 내부 모습을 나타내고 있다.



Fig. 3.7.1. 육계사 복합 환기 시스템 실험 장소
(충북 음성군 육계사육 농가-무창계사)



Fig. 3.7.2. 로드셀 부착 연료탱크



Fig.3.7.3. 로드셀 데이터로거



Fig. 3.7.4. 비교동 육계사 내부

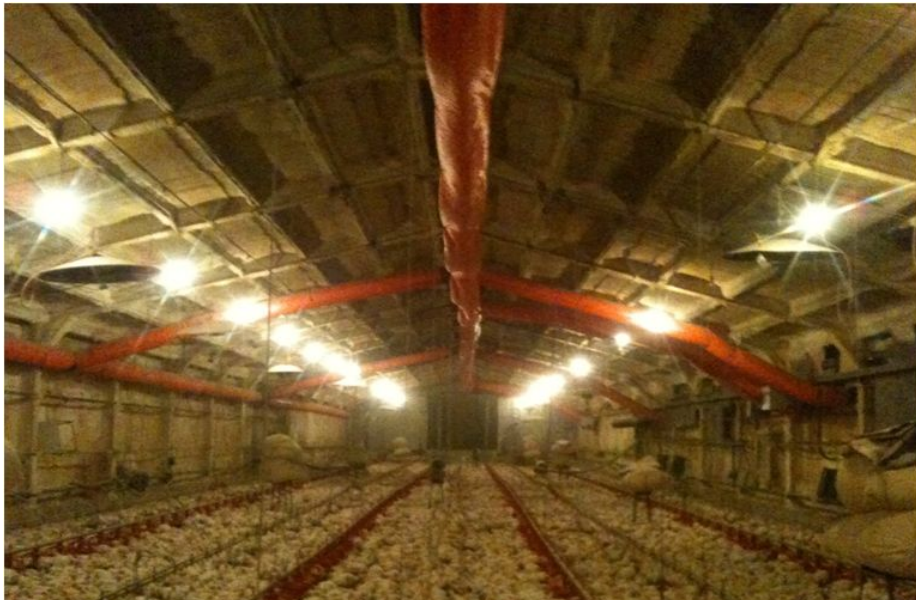


Fig. 3.7.5. 실험동 육계사 내부

나. 실험 육계사의 개요

계사의 지붕 및 측벽이 우레탄으로 단열되어있는 무창계사이다. 비교동의 길이는 76m로 실험동의 길이 74m보다 크므로 비교동에서는 22,500마리/회, 실험동에서는 21,000마리/회 정도를 년 6회 사육하고 있으며, 각 동의 입기구의 크기 및 개수에서 약간의 차이가 있다.

아래의 Table 3.7.1은 실험동, 비교동 육계사의 구조를 나타내고 있다

Table 3.7.1. 실험동 육계사의 구조

		호칭	단위	치수
계사외관	계사길이(L)		m	73(76)
	계사폭(W)		m	13
	계사측벽높이(H2)		m	3.5
	계사마루높이(H1)		m	5.5
	계사체적(V)		m ³	4,500
급기구	급기구 길이(LW)		mm	550
	급기구 높이(HW)		mm	250(130)
	급기구 공기유입 각도		Deg	20°
	계사바닥-급기구 중심 높이(H3)		m	3
	급기구 수량	좌 측(NW-LF)	개	19(25)
		우 측(NW-RF)	개	51(70)
	급기구 중심 거리	좌 측(PW-LF)	m	
		우 측(PW-RF)	m	
계사입구- 처음 급기구 중심 거리	좌 측(PPW-LF)	m		
	우 측(PPW-RF)	m		
배기팬	팬 직경		mm	600
	팬 수량		개	5
	계사바닥 - 팬 중심 높이(FH)		m	2
	계사 측벽 - 팬 중심 거리(FW)		m	14
	계사 양끝단과 팬 간 거리(PFW)		m	10
	팬 풍량		CMH	5,600
	팬 총 풍량		CMH	28,000

※()는 비교동(1동)의 치수

Table 3.7.1의 배기팬은 육계사 측벽에 설치된 크로스 배기팬으로 주로 동절기 환기를 위해 사용하고 있다. 위 표에 기술되어 있지는 않지만 하절기에는 계사 뒷벽에 설치된 총 9개의 48인치 팬을 사용한다. 하절기에 사용되는 쿨링 패드도 양쪽 측벽에 설치되어 있다.

다. 실험대상 육계사의 손실계수 측정 실험

경제적인 육계사 복합 환기시스템을 구축하기 위해서는 사용할 폐열회수 환기장치의 규모를 적절하게 선정할 필요가 있다. 폐열회수 환기장치가 담당하는 환기량이 많으면 연간 에너지 절감량은 증가하겠지만 경제성은 감소하고, 닭의 일령이 증가할수록 발열량이 점점 많아져 외기가 영하의 온도를 유지해도 외기냉방을 위해

추가적인 환기가 필요하므로 이로 인해 오히려 호흡기 질환을 유발시키는 부작용이 발생할 수 있다. 따라서 적절한 용량의 폐열회수환기장치를 선정하기 위해서는 계사의 손실열량과 일령에 따른 닭의 발열량에 대한 자료가 필요하다.

육계사에서 집단으로 사육하는 닭의 발열량은 여러 문헌을 통해 연구결과가 발표되어 있지만 계사의 손실열량은 계사조건에 따라 상이하다. 본 연구에서는 경제적인 육계사 복합 환기시스템을 구축하기 위해 실험대상 육계사의 손실열량을 측정하여 육계사의 열손실계수를 측정하였다.

육계사의 손실열량은 외벽손실, 침기손실, 환기손실로 구성되며, 모두 계사의 실내외 온도차에 비례한다. 여기서 측정한 손실열량은 환기손실을 제외한 외벽손실과 침기손실의 합이다. Fig. 3.7.6.은 측정기간 동안 육계사 실내외 온도, Table 3.7.2.는 측정결과를 나타낸 것이다. 복사열 영향을 제거하기 위해 야간(21:00~09:00)에 측정하였다. 비교동과 실험동의 열손실계수는 각각 1,359 Kcal/hrK, 1,573Kcal/hrK로 측정되었고 실험동의 열손실계수가 비교동에 비해 약 15%정도 높게 나타나 동일 환경에서 실험동의 에너지 소비량이 더 많을 것으로 예상된다.

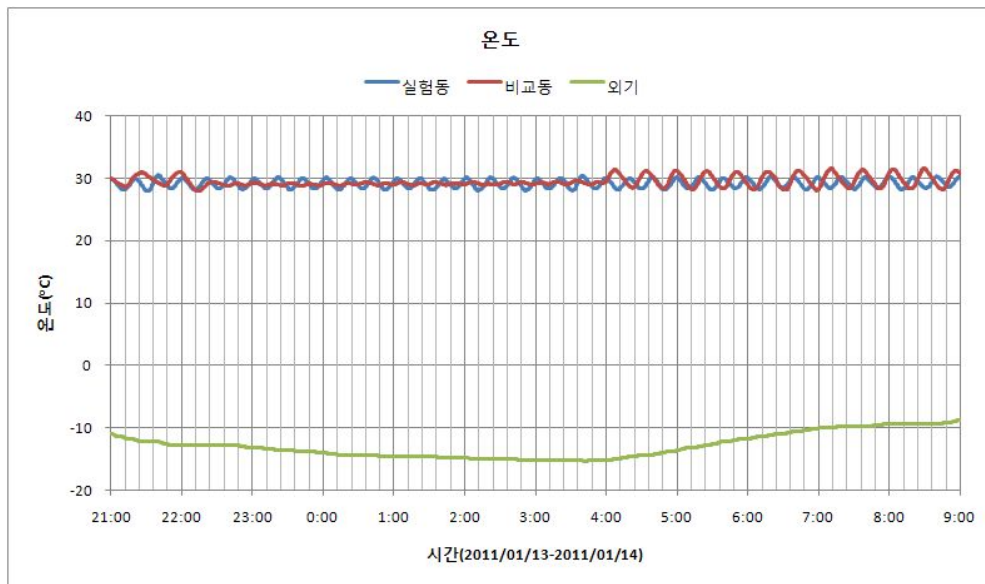


Fig. 3.7.6. 실험 육계사의 손실열량 측정을 위한 실내외 온도

Table 3.7.2. 육계사 열손실계수 측정결과

	실험동(2동)	비교동(1동)
측정시간(hr)	12	12
등유 소비량(Kg)	77	67
시간당 평균발열량(Kcal/hr)	66,055	57,476
실내외 평균 온도차(°C)	42.0	42.3
총괄 열손실계수(Kcal/hr K)	1,573	1,359

라.. 실험 환기량

Fig.3.7.7은 20,000수를 사육하는 육계사에 필요한 일령별 최소환기량 권고기준과 실험에 사용한 환기량 기준을 나타내고 있다. 일반적으로 입추일로부터 일주령은 암모니아, 이산화탄소 등과 같은 유해가스제거, 일주령을 초과하면 육계사 내부 습기제거에 필요한 환기량이 최소환기량 권고기준이 된다. 본 실험대상 농가는 매회 깔집을 교환하므로 암모니아 가스의 발생이 상대적으로 적은 계사이고, 그 동안 최소환기량 권고기준보다 적은 환기량을 적용한 농가이므로 농장주와 협의하여 최소 환기량 권고기준보다 약간 적은 실험 환기량을 적용하여 운영하였다. 물론 외기냉방이 필요한 경우에는 실험 환기량보다 많은 환기를 하였다.



Fig. 3.7.7. 실험 환기량과 최소환기량 권고기준

마. 환기시스템 운영방법.

폐열회수 환기장치를 이용한 육계사 환기시스템을 적용한 실험동의 기본적인 환기방법은 Table 3.6.2와 Table 3.6.4에 나타내고 있다. 환기량이 9,000CMH이하인 경우에는 HRV로 환기하고 초과분에 대해서만 SED 또는 육계사 배기팬에서 환기한다. 비교동에서는 모든 환기량을 육계사 배기팬이 담당하고 있다.

HRV로만 환기할 경우 외기는 열교환 후 따뜻한 공기상태로 HRV Duct를 통해 계사내부로 공급되므로 계군위치에서의 열적 불균일성과 이로 인한 호흡기질환이 발생할 우려는 없다. 그러나 비교동과 실험동의 환기량이 9,000CMH를 초과할 경우 환기시스템의 운영방법에 주의를 할 필요가 있다.

배기팬을 이용한 육계사의 일반적인 환기방법은 ON/OFF 주기운전을 한다. Table 3.7.3은 최대 풍량 30,000CMH인 육계사 배기팬을 사용하여 환기량에 따라 3분주기로 운전하는 방법을 나타내고 있다.

Table 3.7.3. 육계사 배기팬을 이용한 3분주기 운전

환기량(CMH)	ON Time(Sec)	OFF Time(Sec)	주기(Sec)
1,000	30	870	900
5,000	30	150	180
10,000	60	120	180
15,000	90	90	180

육계사 배기팬이 담당하는 환기량이 5,000CMH이하인 경우에는 ON Time이 고정되어 있고 주기를 늘여 환기를 하지만 그 이상인 경우는 주기가 고정되어 있고 ON Time을 증가시켜 환기한다. 이런 방법의 주기 운전 환기에서는 환기량이 증가할수록 ON Time이 길어져 계군 위치에서 열적 불균일성이 발생하고 이로 인해 호흡기 질환이 발생한다.

본 연구에서는 주기 운전시 적절한 ON Time을 선정하기 위해 육계사 배기팬을 이용한 환기시 계군 위치의 열적 균일성에 대해 시뮬레이션하였다. 계군 위치의 열적균일성 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 유지하기 위해서는 실내공기 25일령조건에서 외기온도 -5°C , -15°C , -25°C 에서 ON Time이 각각 18, 13, 10초로 분석되었다. Fig. 3.7.8.는 육계사 배기팬이 작동하기전의 내부 모습이고 Fig.3.7.9.는 육계사 배기팬이 작동하여 계사 측벽의 급기구를 통해 유입된 외기로 인해 발생하는 공기중 결로현상을 보여주고 있다. 관찰 결과 배기팬 작동 후 약10초가 경과하면 계사중앙의 계군에서 공기 중 결로현상이 나타나기 시작한다. 따라서 본 연구에서는 계군위치의 열적균일성을 높이기 위해 동절기에 한해 육계사 배기팬의 ON Time을 10초로 고정하고 환기량에 따라 주기를 감소하는 방법으로 환기 시스템을 운영한다. Table 3.7.4.는 ON Time을 10초로 고정한 주기 운전 방법을 나타내고 있다.

Table 3.7.4. ON Time 고정 육계사 배기팬의 주기 운전

환기량(CMH)	ON Time(Sec)	OFF Time(Sec)	주기(Sec)
1,000	10	290	300
5,000	10	50	60
10,000	10	20	30
15,000	10	10	10



Fig. 3.7.8. 외기유입 전 계사내부



Fig. 3.7.9. 외기유입으로 인한 결로

폐열회수 환기장치를 육계사에 도입할 경우 예상되는 문제점은 닭의 체열로 인한 육계사 내부 온도상승을 억제하기 위한 외기냉방이다. 일반 음압식 육계사 환기 시스템의 외기냉방 방법은 계사내부 온도가 설정온도로 내려갈 때까지 사용 가능한 배기팬을 연속 운전하여 환기량을 증가 시키면서 외기냉방을 한다. 이때 외기온도가 너무 낮으면 닭에 호흡기 질환이 발생하므로 외기냉방을 신중히 운영할 필요가 있다. 폐열회수 환기장치를 육계사에 도입할 경우 일반 육계사 환기 시스템보다 더 낮은 외기온도에서 외기냉방을 해야 할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구의 폐열회수 환기장치를 이용한 육계사 환기시스템에서는 계사내부의 온도변화율을 측정하여 외기냉방을 위한 필요 환기량을 계산하였고 이를 이용한 외기냉방 실험하였다.

바. 실험결과

실험은 Table 3.7.5와 같이 총 7회를 실시하였으며 1-4회는 육계사 복합시스템 A, 5-7회는 육계사 복합 시스템 B를 적용하여 실험을 하였다. 1회차 실험은 1차 모델 HRV의 해빙운전과 SED의 효율성에 주안점을 두고 실험하였다. 2-7회차는 연간 에너지 사용량 분석을 통한 난방에너지 절감율, 개선된 2차 모델 HRV와 복합 환기

시스템의 적절성 평가에 주안점을 두고 실험하였다.

Table 3.7.5. 회차별 실험 기간

회차	입추일	출하일	사육기간(일)
1	2011-01-14	2011-2-17	34
2	2011-03-24	2011-04-28	35
3	2011-06-03	2011-07-04	32
4	2011-07-22	2011-08-23	33
5	2011-09-23	2011-10-21	29
6	2011-12-08	2012-01-06	30
7	2012-02-02	2012-03-4	31

Fig. 3.7.10부터 Fig. 3.7.29는 1차부터 6차 실험까지 계사내부 온습도, 외기온도, 에너지 누적사용량을 나타내고 있다. 3차, 4차 실험은 하절기로 폐열회수 환기장치를 이용한 육계사 환기시스템이 필요한 기간이 아니다. 1, 2, 5, 6, 7차는 에너지 사용량도 많고 호흡기 질환이 자주 발생하는 기간이므로 육계사 복합 환기시스템의 효율성을 검증할 수 있는 좋은 기간이다.

동절기와 하절기인 1, 2, 5, 6, 7차 모두 내부 온도는 권고기준 온도 보다 약 2-3도정도 높게 관리하고 있음을 보여주고 있다. 이것은 농장주가 호흡기 질환에 대한 두려움으로 온도를 높게 관리해주시기를 요청하였기 때문이다. 1차 실험 3일령 새벽에 실험동의 계사온도 15도로 급격히 낮아지고, 상대습도가 급격히 높아진 시간이 발생하였으며 이것은 실험동 난방기의 문제로 난방을 하지 못한 시간이 4시간 정도 유지되었기 때문이다.

습도는 적절한 환기량을 유지하고 있는지를 보여주는 중요한 지표이다. 입추일부터 약 5일령까지의 가습기간과 외기냉방이 필요한 기간을 제외하고는 계사내부 상대습도가 65%내외로 유지하고 있으면 적절한 환기량을 유지하고 있다고 할 수 있다. 물론 1주령이 지나면 계사내부 상대습도가 40-65% 범위 내에서 환기량은 많을수록 좋지만 에너지비용을 최소화하기 위해 적절한 환기량을 유지할 필요가 있다. 실험동은 3, 4차를 제외하고 모두 적절한 상대습도를 유지하고 있다. 이것은 실험을 위해 설정한 최소 환기량이 적절함을 나타낸다. 그러나 비교동은 상대습도가 65%를 초과하는 기간이 많다. 1차 실험에서는 6-9일령, 20일령 이후 대부분 기간, 2차 실험에서는 6-21일 야간, 5차 실험에서는 15-21일 야간에는 상대습도 높게 나타난다. 이것은 비교동에서는 실험을 위해 설정한 최소 환기량을 유지하고 못하고 있는 것을 나타내며, 농장주가 호흡기질환 발생을 우려하여 외기온도가 낮을 경우 환기량을 인위적으로 감소시켰기 때문이다. 특히 1차 실험 5주령에서는 상대습도가 80%를 초과할 정도로 환기부족 상태로 계사를 운영하였고 이것은 닭의 생육에 적

합하지 않는 환경상태라 생각된다. 3,4차에 상대습도가 높은 이유는 하절기 외기냉방을 위해 쿨링패드를 사용하였기 때문이다.

Table 3.7.6.은 1,2차 사육성적으로 두 동의 사육성적은 크게 차이하지 않았으나 동일한 시기에 육계를 사육한 다른 농가에 비해 우수한 사육성적을 달성하였다. 이것은 비교/실험동 모두 호흡기질환을 예방하기 위해 본 연구에서 제안한 환기방법을 사용한 결과 1,2차 모두 호흡기 질환이 발생하지 않았기 때문이다.

Table 3.7.6. 1,2차 사육성적

차수		사육일 (일)	실 입추수수 (입추수수)	출하수수	육성율 (%)	평균중량 (Kg)	사료요구율 (기준)
1	비교동	33	23,700 (23,000)	22,781	96.1 (99.0)	1.648	
	실험동	34	22,700 (22,000)	21,935	96.6 (99.7)	1.711	
	합계(평균)			46,400 (45,000)	44,716	96.4 (99.4)	1.652
2	비교동	35	21,900 (21,200)	21,287	97.2 (100.4)	1.968	
	실험동	35	21,100 (20,500)	20,593	97.6 (100.4)	1.972	
	합계(평균)			43,000 (41,700)	41,880	97.4 (100.4)	1.970

Table 3.7.7.은1차, Table 3.7.8.은 2-7차 실험의 에너지 사용량과 절감율이다. 1차 실험의 에너지 절감율은 53.9%로 계절적으로 비슷한 시기인 6,7차 실험의 63.5%, 70%보다 현저히 낮다. 1차 실험에서는 비교동의 환기량을 실험동보다 적게 했음에도 불구하고 에너지 절감율이 상대적으로 낮게 나타난 것은 1차 모델 HRV에서 채택한 해빙유로가 효과적이지 않기 때문이다. 실제 실험에서 6,7차 실험에 적용한 2차 모델 HRV보다 해빙시간과 횟수가 많았다.

2-7차 실험(총 6회)를 기준으로 한 에너지 절감율은 64.1%이고 절감량은 8,344리터이다. 2-7차 실험 중 비교동의 환기량을 최소환기 권고기준에 근접하게 유지한 결과 비교동의 연간 에너지 사용량은 약 13,000리터로 국내 무창계사의 에너지 사용량 표준인 15,000리터보다 적다. 2-7차 실험동안 두 계사의 상대습도를 비교하면 비교동이 실험동보다 전반적으로 높게 형성되어 있음을 고려하면 실험동이 비교동보다 실제 환기량이 더 많았다는 것으로 유추할 수 있다. 이것은 동절기 주간이나 환절기에 실험동이 비교동보다 외기냉방을 더 많이 했지만 2차, 5차 실험의 일정 일령에서는 비교동의 환기량을 인위적으로 줄였기 때문이다.

Table 3.7.7. 1차 실험 에너지 사용량(등유)

차수	입추일	출하일		에너지 사용량(L)-등유			
		비교동	실험동	비교동	실험동	절감량	절감율(%)
1	11-01-14	11-02-16	11-02-17	3,202	1,497	1,705	53.2

Table 3.7.8. 2-7차 실험 에너지 사용량(등유)

차수	입추일	출하일		에너지 사용량(L)-등유			
		비교동	실험동	비교동	실험동	절감량	절감율(%)
2	11-03-24	11-04-28		2,359	852	1,507	63.9
3	11-06-03	11-07-04	11-07-02	128	95	33	25.8
4	11-07-22	11-08-23		125	105	20	16.0
5	11-09-23	11-10-21	11-10-20	1,254	578	676	53.9
6	11-12-08	12-01-06		4,575	1,671	2,904	63.5
7	12-02-02	12-03-04		4,577	1,373	3,205	70.0
합 계				13,018	4,674	8,344	64.1

2차 모델 HRV를 적용한 6차, 7차 실험에서 외기온도가 -16℃까지 내려갔음에도 불구하고 12일령 이후 실험동의 에너지 사용량은 매우 적다. 이것은 20,000수 사육하는 무창계사의 경우 HRV를 이용한 환기량이 9,000CMH정도면 충분하다는 것을 나타낸다.

2-7차에 걸친 실험 결과는 총괄 열손실계수가 높은 유창계사에서도 적용할 수 있고 향후 유창계사에 적합하고 경제성있는 육계사 환기시스템을 구성하는 자료로 사용할 수 있다.

Fig. 3.7.31.은 7차 실험 24일령에 본 연구에서 개발한 방법으로 외기냉방을 하는 사례를 보여주고 있다. HRV를 사용하지 않은 비교동에서는 Fig. 3.7.30.와 같이 열풍기를 이용한 난방을 하고 있으나 실험동에서는 환기량 13,600CMH중 9,000CMH를 HRV가 환기하고 있으므로 외기가 -5℃로 내려갔음에도 불구하고 외기냉방이 필요하다. 본 연구의 외기냉방은 계사 내외부의 환경변화에 적응하여 계사의 평균온도가 설정온도에 근접할 수 있는 환기량을 자동으로 계산하여 환기하는 방법이다. Fig. 3.7.31.과 같이 외기온도에 따라 외기냉방에 필요한 환기량을 증가, 감소시키고, 계사의 설정온도가 변화되면 거기에 적합한 환기량을 계산하여 환기함으로써 계사내부 평균온도를 급격히 변화시키지 않고 균일하게 유지하면서 외기냉방을 할 수 있었다.

기존의 육계사 환기시스템으로 외기냉방을 하면 환기량이 일시적으로 증가하여 계사로 유입된 -5℃의 차가운 외기가 급속히 하강하고 계군 온도의 열적 불균일성이 야기되어 호흡기 질환의 원인이 되지만 본 연구의 방법으로 이를 예방할 수 있음을 보여주고 있다.

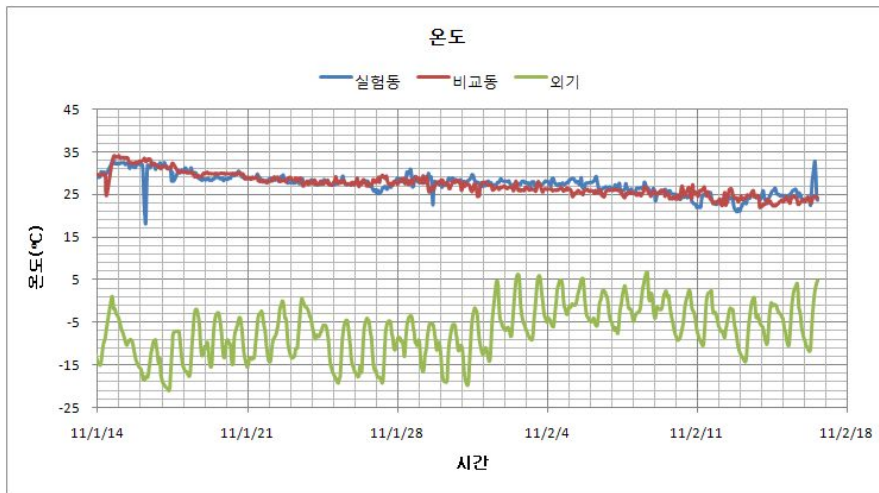


Fig. 3.7.10. 일령별 온도변화(1차)

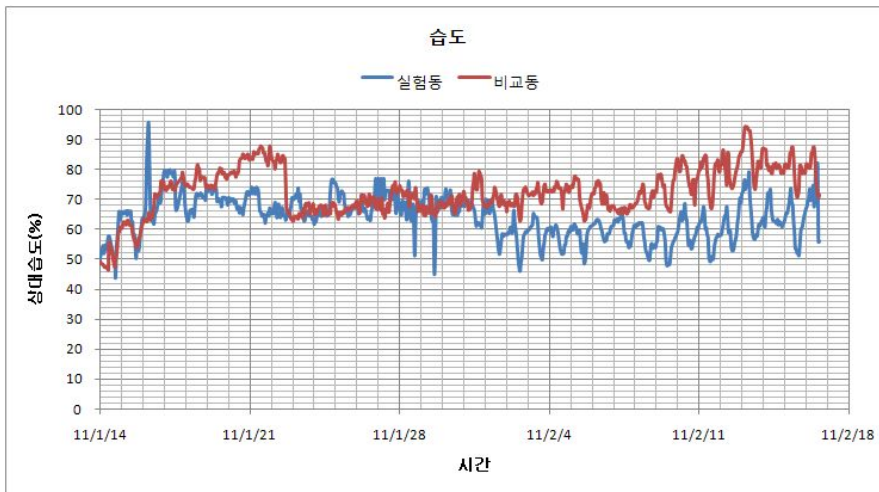


Fig. 3.7.11. 일령별 습도변화(1차)

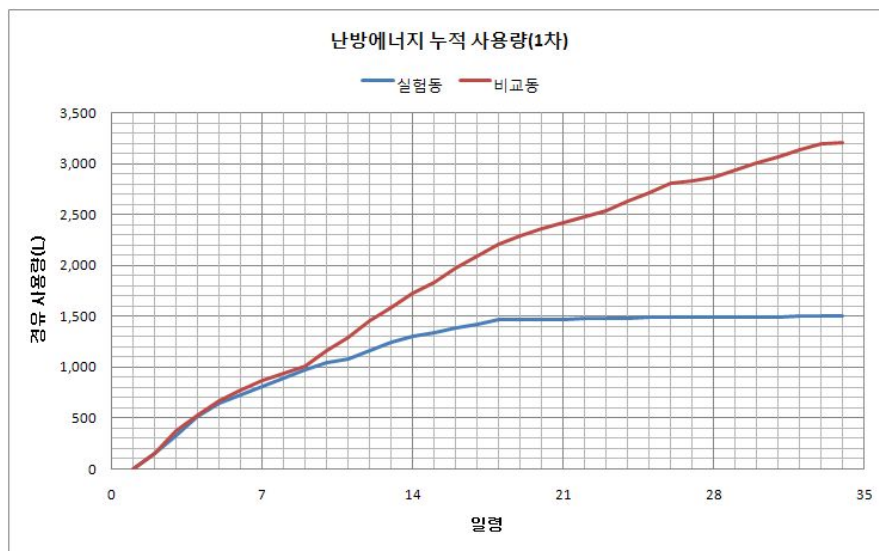


Fig. 3.7.12. 난방에너지 누적사용량(1차)

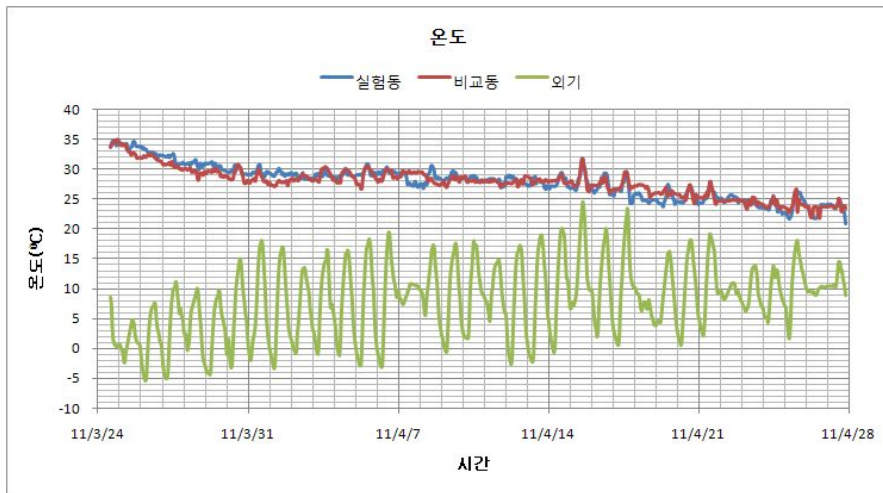


Fig. 3.7.13. 일령별 온도변화(2차)

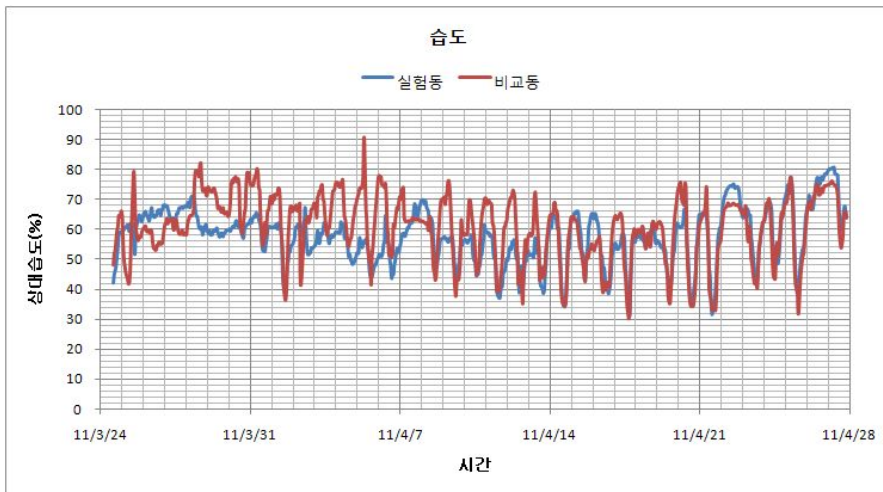


Fig. 3.7.14. 일령별 습도변화(2차)

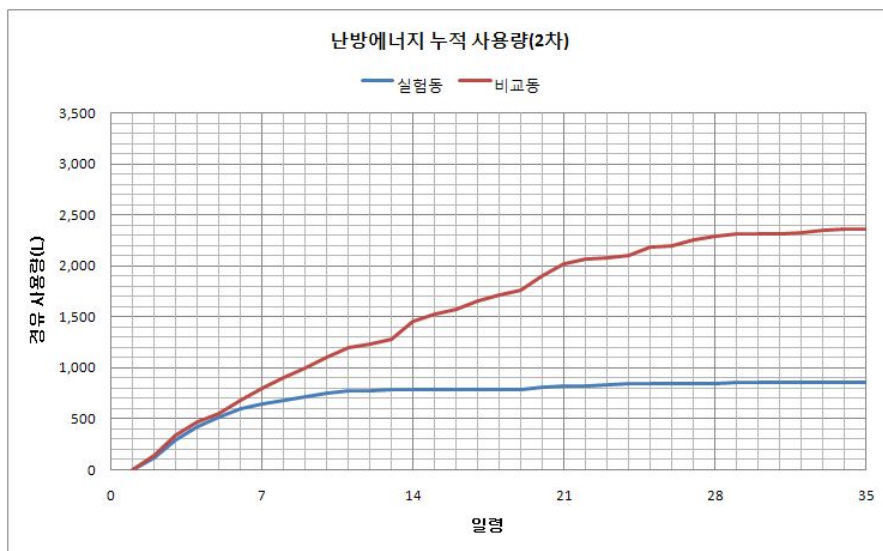


Fig. 3.7.15. 난방에너지 누적사용량(2차)

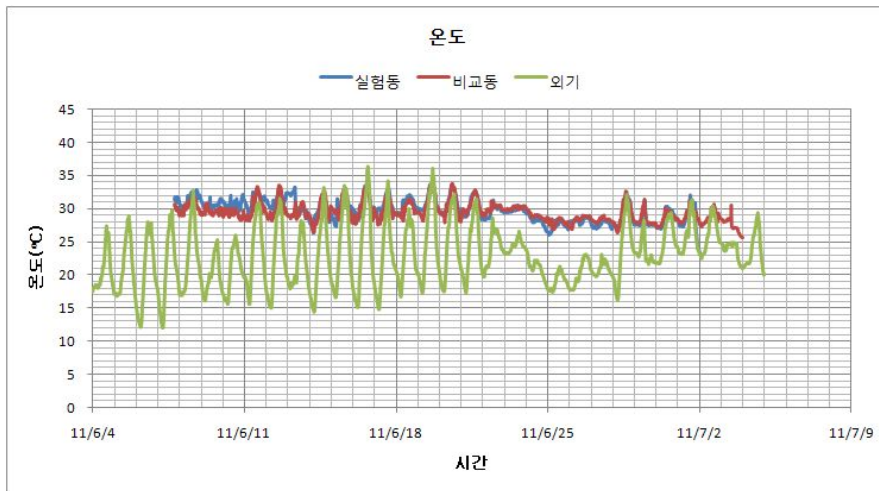


Fig. 3.7.16. 일령별 온도변화(3차)

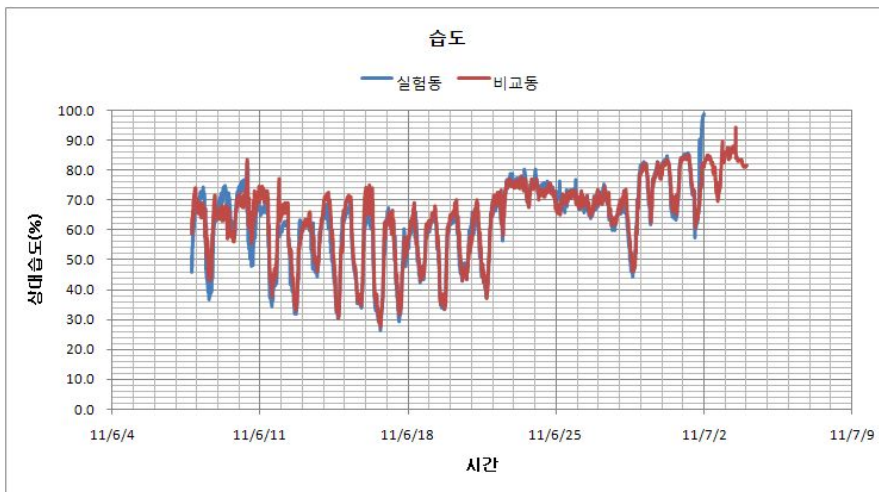


Fig. 3.7.17. 일령별 습도변화(3차)

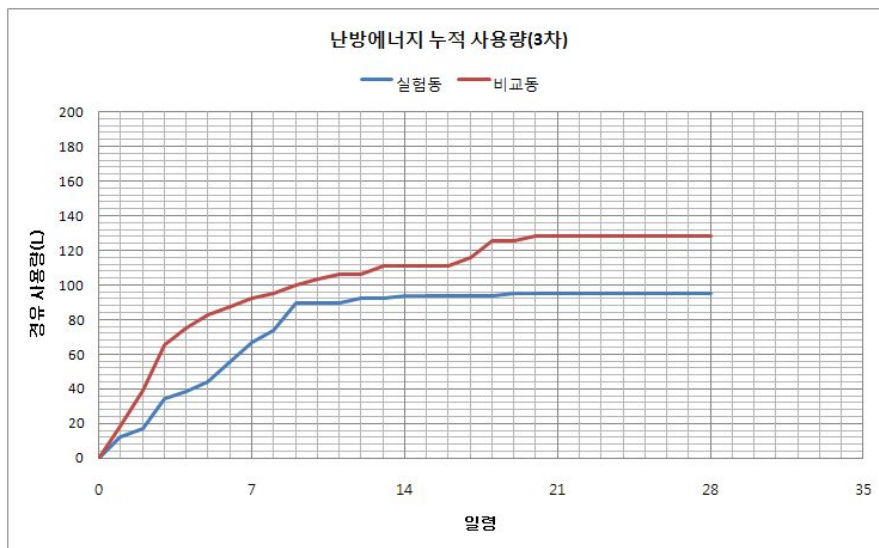


Fig. 3.7.18. 난방에너지 누적사용량(3차)

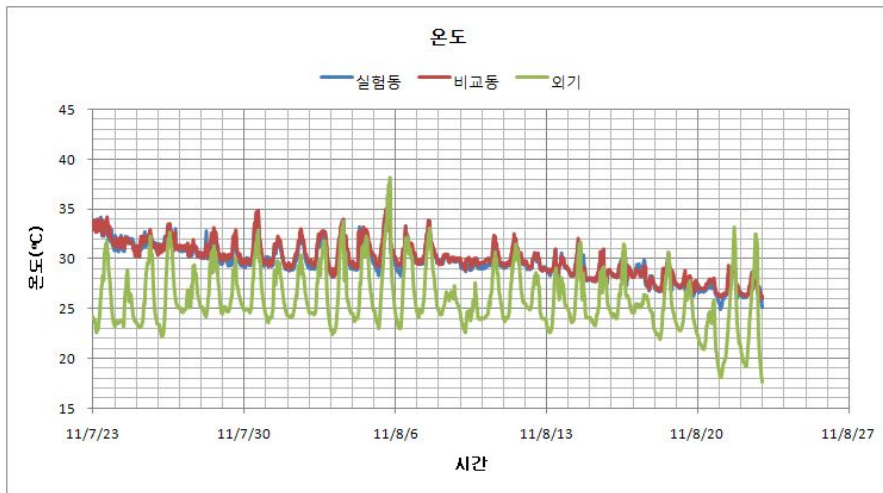


Fig. 3.7.19. 일령별 온도변화(4차)

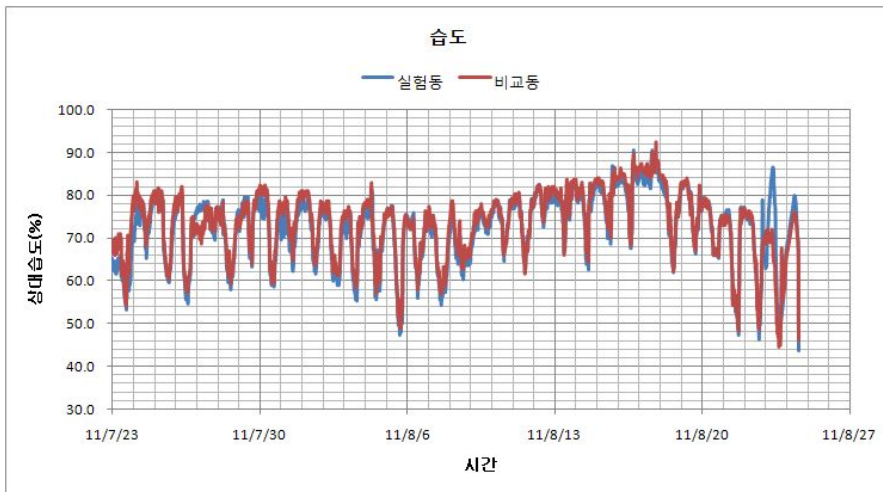


Fig. 3.7.20. 일령별 습도변화(4차)

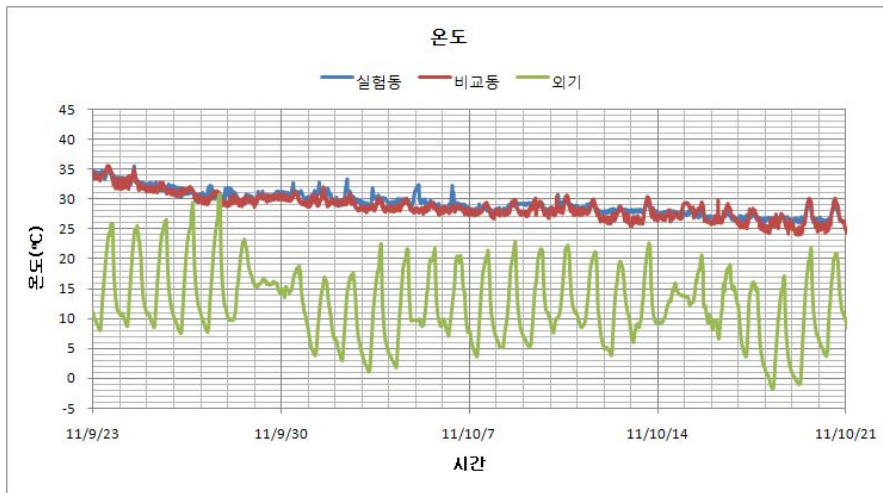


Fig. 3.7.21. 일령별 온도변화(5차)

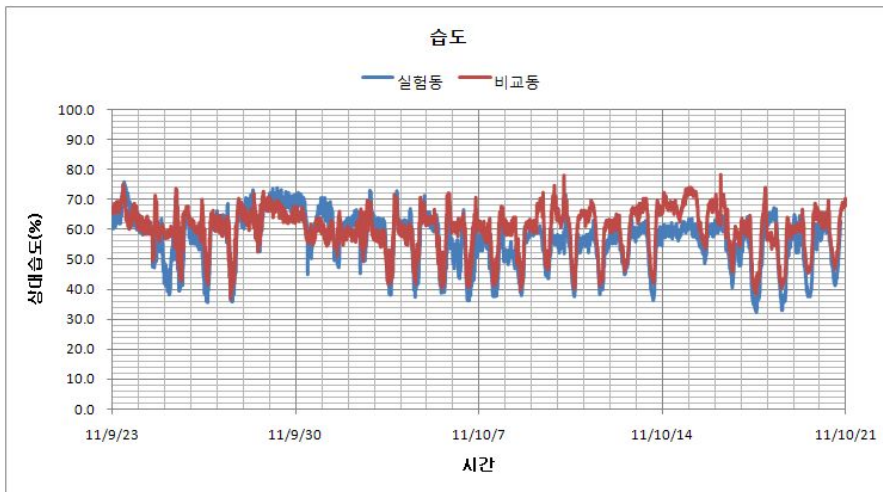


Fig. 3.7.22. 일령별 습도변화(5차)



Fig. 3.7.23. 난방에너지 누적사용량(5차)

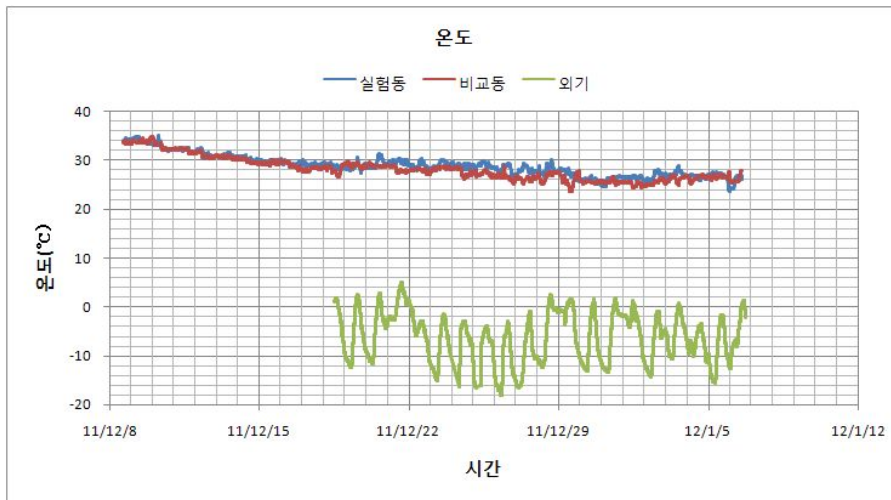


Fig. 3.7.24. 일령별온도변화(6차)

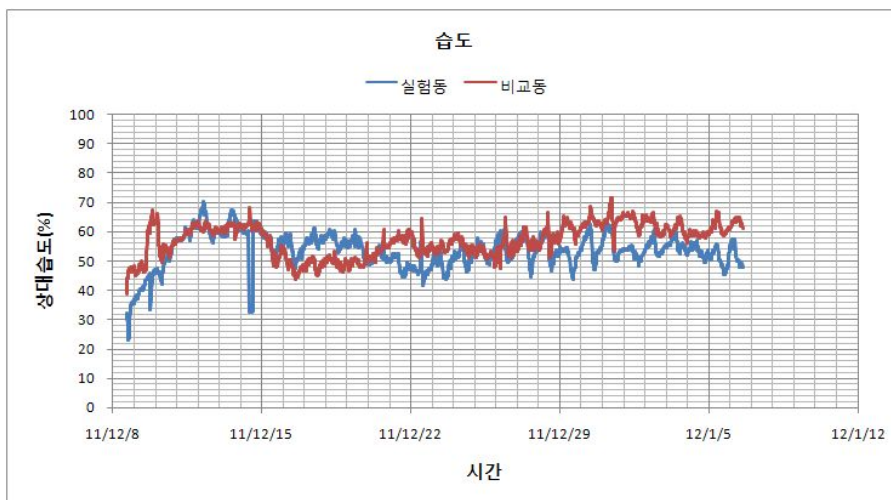


Fig. 3.7.25. 일령별 습고변화(6차)

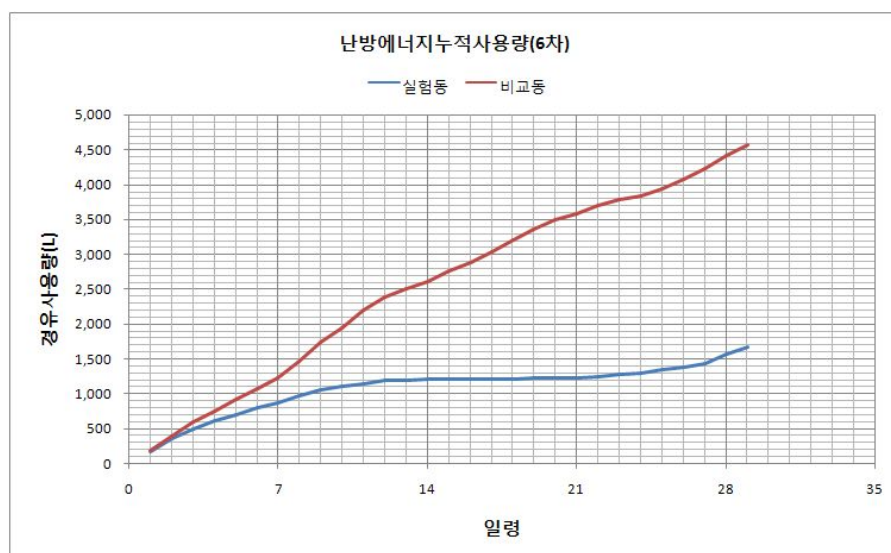


Fig. 3.7.26. 난방에너지누적사용량(6차)

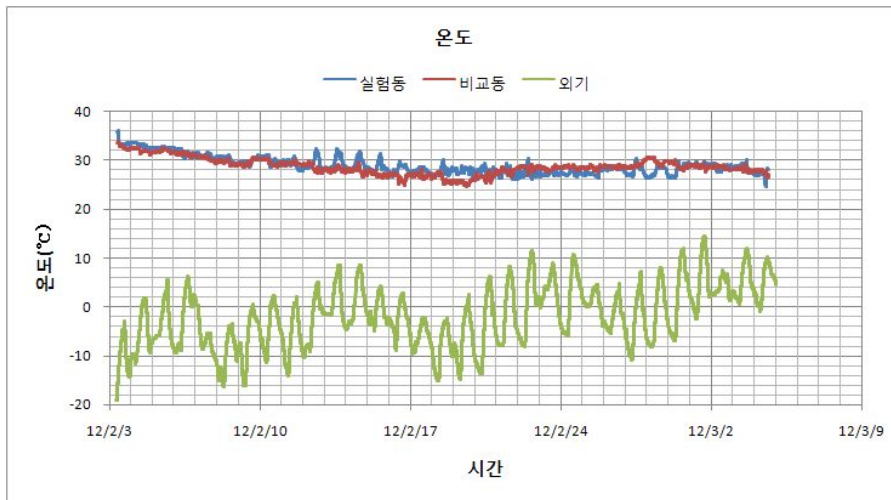


Fig. 3.7.27. 일령별 온도변화(7차)

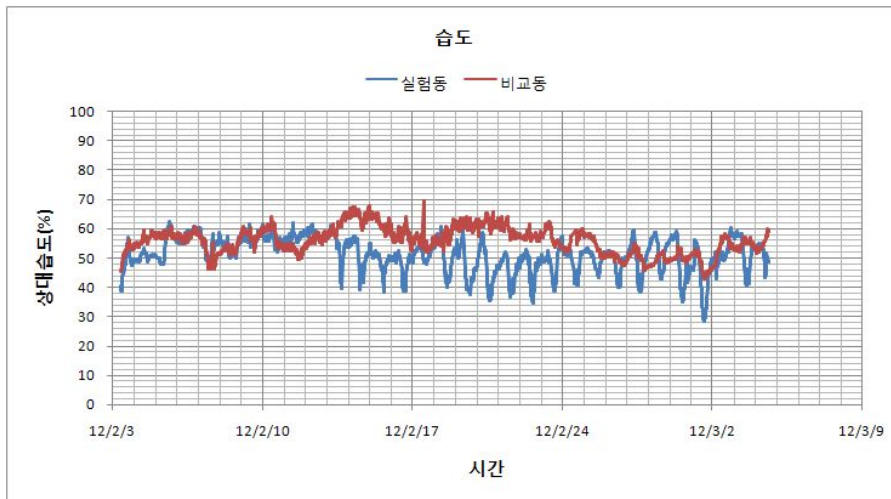


Fig. 3.7.28. 일령별 습도변화

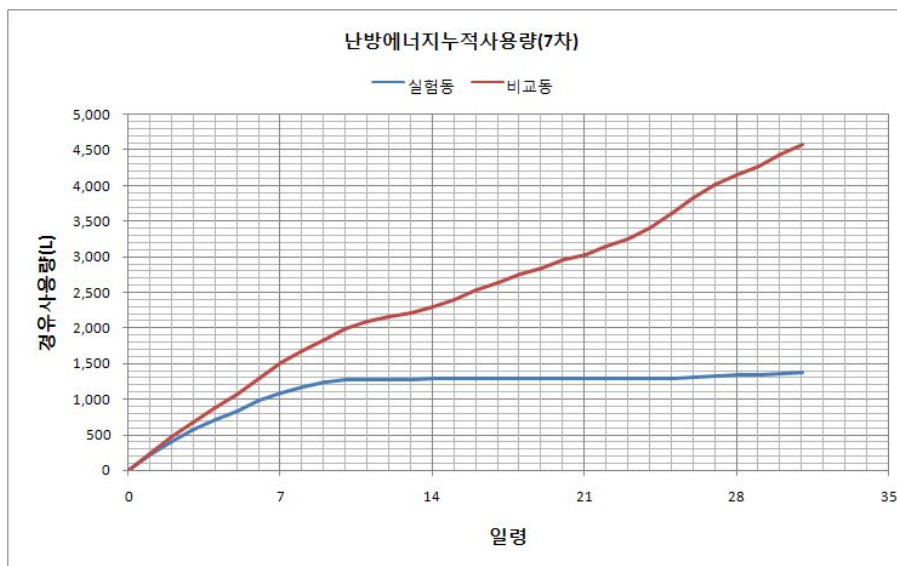


Fig. 3.7.29. 난방에너지 누적 사용량(7차)

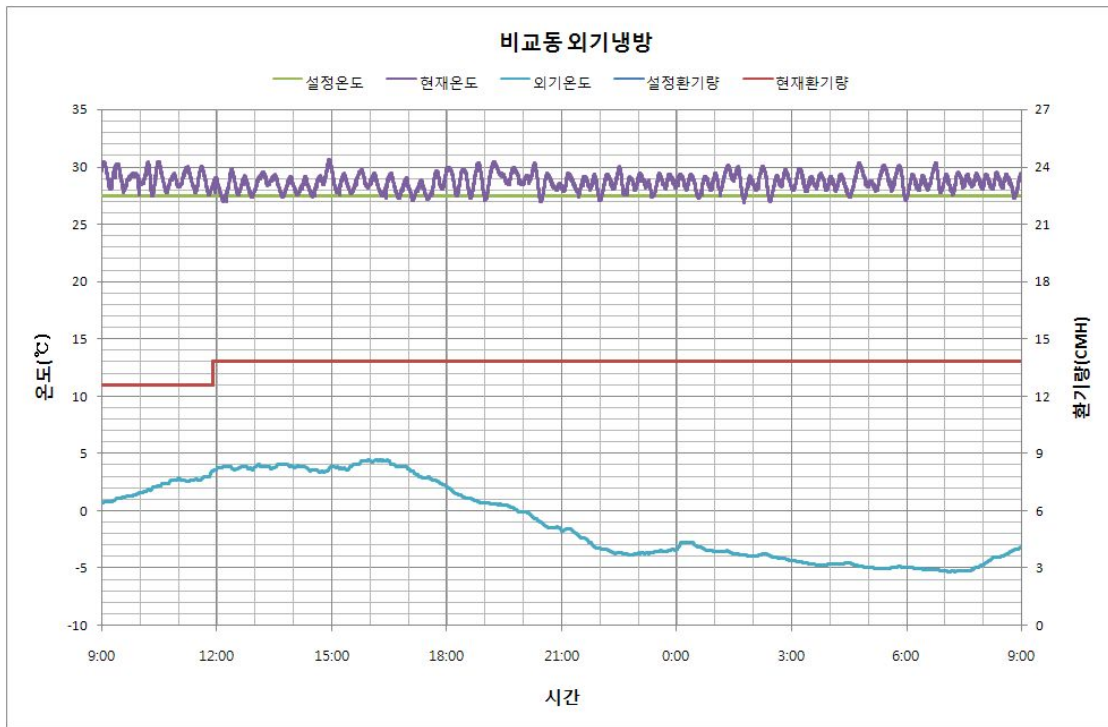


Fig. 3.7.30. 비교동 온도 및 환기량

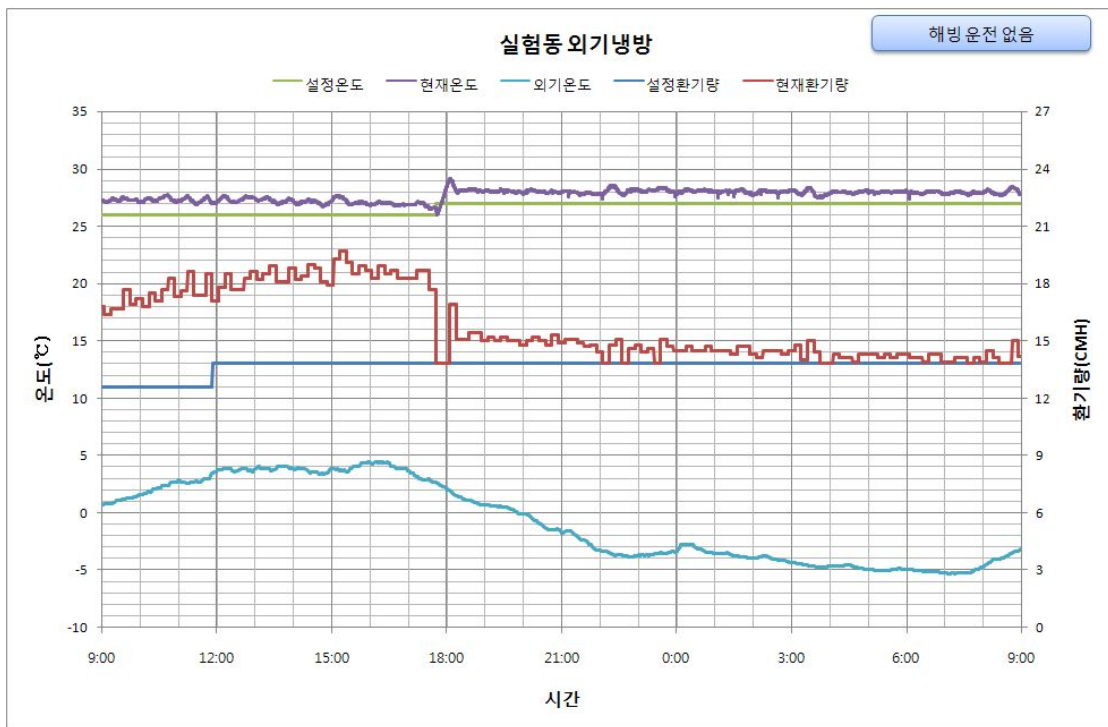


Fig. 3.7.31. 실험동 외기냉방(온도 및 환기량)

3. 미국 South Carolina주 Summerton 육계농가 실험

Fig. 3.7.32.는 본 연구에서 개발된 폐열회수 환기장치를 미국 육계사에 적용하기 위해 실험한 Summerton의 육계농가이다. 무창계사 20,000수 사육 규모 육계사로서 길이 500ft, 폭 40ft이고 측벽높이는 7ft이다. 국내 육계사의 동일 사육규모에 비해 약 1.5배의 바닥면적이다. 통상 출하 중량이 8lb정도 이므로 단위 면적당 사육수수가 국내농가의 2/3정도 수준이다. 입추 후 2주령까지는 육계사의 1/2만 사용한 부분 육추를 하고 3주령부터 전체 육추를 한다. 이 지역은 겨울철에도 영하로 내려가는 경우가 거의 없어 난방에너지 사용량이 적고 호흡기 질환이 거의 발생하지 않는다. 따라서 육계사 복합 환기시스템보다는 본 연구에서 개발한 HRV를 2대만 설치하여 난방에너지에 미치는 영향과 경제성을 검토하였다.

국내에서는 입추 후 3-5일령 동안에는 계사 내부공기의 상대습도를 70%이상으로 유지하고 에너지 비용을 절감하기 위해 환기량을 적게 하고 가습기를 사용한다. 그러나 미국의 실험농장에서는 상대습도보다는 재활용한 깔집에서 발생한 암모니아 가스를 제거하기 위해 입추일부터 환기를 많이 하고 가습기를 사용하지 않으므로 처음 1주령 동안 계사 내부공기는 매우 건조한 편이다. 입추 후 3-4주령 까지 환기량은 Fig. 3.7.7.의 최소환기 권고기준의 150%정도이다. 국내보다 환기량이 많지만 기후 조건이 온화한 관계로 겨울철에도 3주령이 경과하면 난방에너지를 거의 사용하지 않는다.

Fig. 3.7.33.은 실험대상 육계사의 외관, Fig.3.7.34.는 설치된 HRV, Fig.3.7.35.는 HRV Cotroller와 육계사 Controller이다. 국내와 달리 2대의 HRV를 육계사 양쪽 측벽에 각각 1대씩 설치하였으며 Fig.3.7.36.의 HRV용 Duct를 통해 급기를 실내로 공급하였다.

2011년 11월 29일부터 시작한 1차실험에서는 에너지 절감율 60%, 2012년 2월 10일부터 시작한 2차 실험에서는 에너지지 절감율 35%를 달성하였고 2차례 실험을 합산한 결과로는 약 50%의 에너지 절감율을 달성하였다.



Fig. 3.7.32. Summerton의 실험 장소



Fig. 3.7.33. Summerton의 무창계사



Fig. 3.7.34. 실험용 HRV

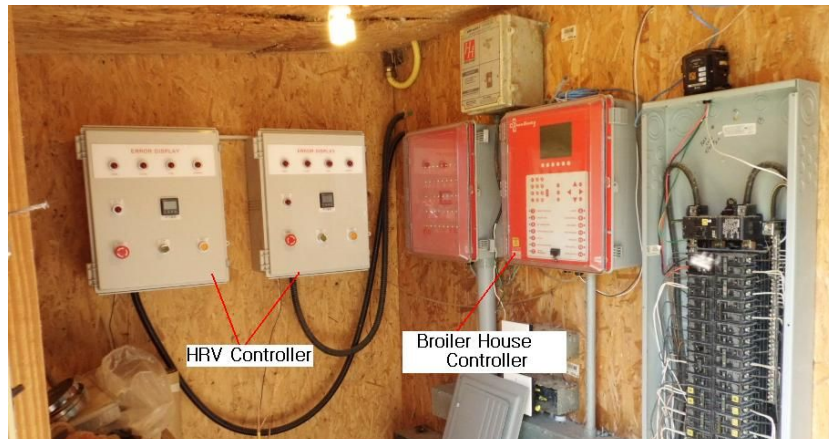


Fig. 3.7.35. HRV and Broiler House Controller



Fig.3.7.36. HRV용 Duct

제 8 절 연구결과

육계사용 폐열회수 환기장치를 위한 현열교환기를 수치해석을 통해 설계하였고 이를 이용하여 대항류 현열교환기를 개발하여 육계사용 폐열회수 환기장치를 개발하였다. 실내공기 조건 건구온도 26℃, 상대습도 60%, 실외공기 건구온도 2℃조건에서 현열교환효율 75%, 환기풍량 3,000CMH인 폐열회수 환기장치를 개발하였다.

자동 세정 필터시스템과 먼지를 누적 없이 자연 배출할 수 있는 현열교환기의 개발을 동시에 진행하여 실험한 결과 개발한 현열교환기는 자동 세정 필터시스템을 사용하지 않아도 년 1-2회 정도의 청소로 현열교환효율을 유지할 수 있음을 실험을 통해 입증하였다. 개발된 육계사용 폐열회수 환기장치는 사용하고 있는 현열교환기의 결빙상태를 파악하고 해빙할 수 있는 기능을 가지고 있어 결빙으로 인한 현열교환효율 감소 문제를 해결하였다.

해빙기능을 가진 폐열회수 환기장치를 이용하여 육계사 환기시스템 A, B를 개발하였으며 기존의 육계사 배기팬과 연계한 육계사 환기시스템B가 더욱더 효과적으로 사용할 수 있으며 7회의 현장실험을 통해 년평균 65%의 에너지 절감율을 달성하였다. 그리고 미국 육계사에 적용하기 위해 South Carolina주 Summerton 육계농가에 폐열회수 환기장치만 설치하여 실험한 결과 약 50%의 에너지 절감율을 달성하였다.

닭의 생육환경을 개선하고 환기로 인한 호흡기질환을 예방하기 위해 환기시 발생하는 계군 온도 열적 불균일성을 감소시킬 수 있는 환기시스템의 운영방안이 제시되었으며 외기냉방시 발생하는 계사내 평균온도의 급격한 변화를 감소시키기 위해 새로운 외기냉방 방법을 제안하였고 실험을 통해 효율성을 입증하였다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1. 수치해석을 통한 대항류 현열교환기 설계 Tool개발

- 가상비열의 개념을 도입한 결로해석모델로 풍량, 외기온도 및 실내 상대습도를 변수로 하여 현열교환효율 변화를 전산유체해석을 통해 분석.

2. 육계사용 폐열회수 환기장치 개발

- 먼지 및 결로수 자연 배출을 위한 대항류형 현열교환기 개발
- 실내공기 조건 건구온도 26℃, 상대습도 60%, 실외공기 건구온도 2℃조건에서 현열교환효율 75%, 환기풍량 3,000CMH.
- 현열교환기의 결빙상태를 실시간으로 파악하고 해빙할 수 있는 해빙운전 기능과 먼지로 인한 유로 막힘을 파악할 수 있는 점검운전 기능 보유

3. 폐열회수 환기장치를 이용한 육계사 환기시스템 개발

- 폐열회수 환기장치와 SED를 이용한 육계사 환기시스템 A 개발
- 폐열회수 환기장치와 기존의 육계사 배기팬을 연계한 육계사 환기시스템 B 개발
- 외기냉방 조건시 필요한 환기량을 실시간으로 계산하여 계사내부 평균온도를 급격히 변화시키지 않고 외기냉방하는 알고리즘 개발
- 육계사 환기시스템 운영 알고리즘 개발
- 실증 실험을 통해 년평균 65%의 에너지 절감율 달성
- 환기로 인한 호흡기질환 발생을 예방

4. 개발된 폐열회수 환기장치의 미국 시장 진입을 위한 실험

- 미국 South Carolina주 Summerton 육계농가에 폐열회수 환기장치만 설치하여 실험한 결과 약 50%의 에너지 절감율 달성
- 미국 육계농가에 적합한 폐열회수 환기장치 개발을 위한 자료 확보

5. 환경 조건에 따른 육계사 내 열환경 분석을 위한 전산유체역학 시뮬레이션 모델 설계

- 현장 실험을 통한 환기 시스템 가동에 따른 육계사 내 다측점에서의 온도 자료 확보 및 이를 이용한 시뮬레이션 모델의 정확도 검증 실시
- HRV 환기 시스템, 크로스 배기팬 및 입기 슬롯 등 시설 내 환기 시설 및 계군에서의 발열량 반영

6. 국내 일반 강제 환기식 육계사 시설에 대한 환기 운영 주기 마련

- 동절기 차가운 외기의 유입으로 인하여 초래되는 계군 내 불균일한 열환경 조성 및 호흡기성 질병의 발생 방지를 위하여 계군 내 온도 적정성 등을 고려한 환기 운영 주기 마련이 필요
- 11일령 조건 시, 외기 조건 (-5℃, -15℃, -25℃) 및 계사 운영자의 열환경 운영 지침(생육 적정온도 ±2℃, ±3℃, ±5℃) 별 계군 내 적정 열환경 조성을 위한 환기 팬 on/off 주기 도출
- 25일령 조건 시, 외기 조건 (-5℃, -15℃, -25℃) 및 계사 운영자의 열환경 운영 지침(생육 적정온도 ±2℃, ±3℃, ±5℃) 별 계군 내 적정 열환경 조성을 위한 환기 팬 on/off 주기 도출
- 계군 내 형성되는 온도 불균일성을 해소하고 지역 간 온도 편차를 최소화함으로써 육계 생산성 제고가 가능할 것으로 기대

7. HRV 복합 환기 시스템 적용 계사 시설에 대한 환기 운영 주기 마련

- 11일령 조건 시, HRV 연속 운전에 따른 외기 조건 (-5℃, -15℃, -25℃) 및 계사 운영자의 열환경 운영 지침(생육 적정온도 ±2℃, ±3℃, ±5℃) 별 계군 내 적정 열환경 조성을 위한 추가 열원 공급 필요 시각 도출
- 25일령 조건 시, 외기 조건 (-5℃, -15℃, -25℃) 및 계사 운영자의 열환경 운영 지침(생육 적정온도 ±2℃, ±3℃, ±5℃) 별 계군 내 적정 열환경 조성을 위한 환기 팬 on/off 주기 도출 (HRV 연속운전)
- 온도 불균일성 해소 등으로 인한 육계 생산성 제고 및 불필요한 에너지 공급의 최소화

8. Jet drop distance 이론을 이용한 계사 운영 지침 제시의 가능성 제고

- 전산유체역학 기법을 이용한 Jet drop distance model의 활용 가능성 검토
- 향후 변수 별 민감도 분석 및 신뢰성 향상된 모델 도출을 통하여 동절기 입기 슬롯으로부터 유입되는 차가운 외기의 궤적 예측 및 조절을 통한 탄력적인 열환경 관리가 가능할 것이라 기대

제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

제 1 절 연구개발 성과

1. 수치해석을 통한 대항류 현열교환기 설계 Tool개발
 - 향후 다양한 종류의 현열교환기 개발에 유용한 Tool로 사용가능.
2. 육계사용 폐열회수 환기장치 개발
 - 육계 농가의 난방에너지 절감에 기여할 것으로 기대
 - 농산물 건조기등 다른 용도로 적용가능
3. 폐열회수 환기장치를 이용한 육계사 환기시스템 개발
 - 기존의 육계사 배기팬을 연계한 육계사 환기시스템의 개발로 환기시스템 시 설비용이 감소. 환기시스템 경제성 제고.
 - 육계사 환기시스템 운영 알고리즘과 외기냉방 알고리즘 개발로 환기로 인한 호흡기질환 예방, 육계 생산성 및 농가소득 증가 기대
 - 실증 실험을 통해 년평균 65%의 에너지 절감을 달성. 난방에너지 비용 감소

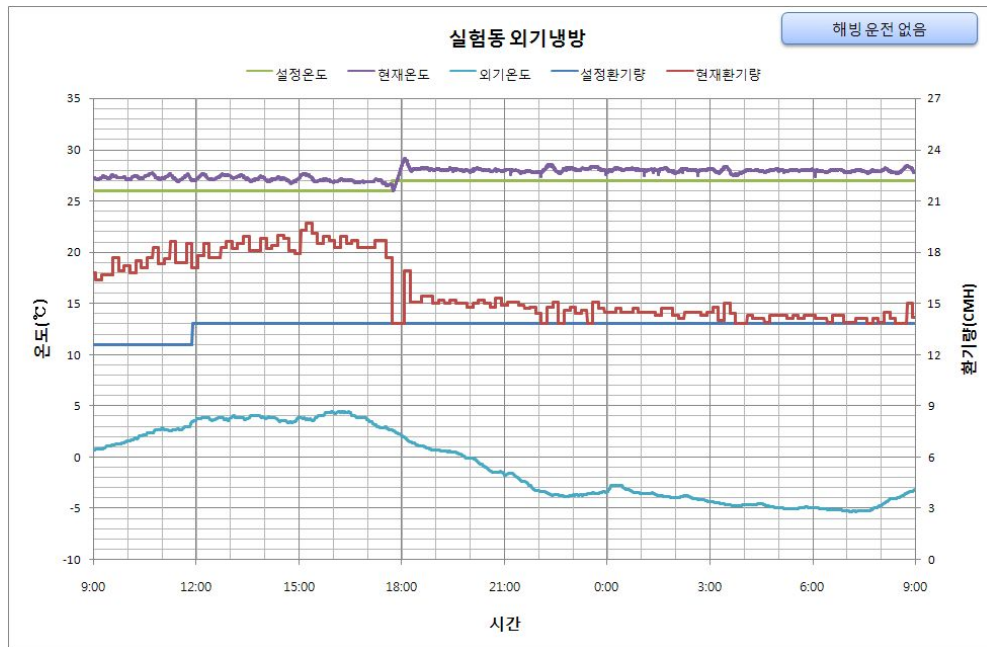


Fig. 5.1.1. 새로운 외기냉방 알고리즘을 적용한 결과 (온도 및 환기량)

Table 5.1.1. 2-7차 실험에서 에너지 사용량(등유)

차수	입추일	출하일		에너지 사용량(L)-등유			
		비교동	실험동	비교동	실험동	절감량	절감율(%)
2	11-03-24	11-04-28		2,359	852	1,507	63.9
3	11-06-03	11-07-04	11-07-02	128	95	33	25.8
4	11-07-22	11-08-23		125	105	20	16.0
5	11-09-23	11-10-21	11-10-20	1,254	578	676	53.9
6	11-12-08	12-01-06		4,575	1,671	2,904	63.5
7	12-02-02	12-03-04		4,577	1,373	3,205	70.0
합 계				13,018	4,674	8,344	64.1

- 연간 에너지 절감량이 약 8,300리터로 1,000만원 정도의 난방비가 절감됨. 육계농가가 개발된 환기시스템을 적용할 경우 투자회수기간은 2.5년으로 예상.

4. 개발된 폐열회수 환기장치의 미국 시장 진입을 위한 토대 구축

- 미국 South Carolina주 Summerton 육계농가에 폐열회수 환기장치만 설치하여 실험한 결과 약 50%의 에너지 절감율 달성
- 미국 육계농가에 적합한 폐열회수 환기장치 개발을 위한 자료 확보

5. 전산유체역학 기법을 이용하여 육계사 환기시스템을 운영방안 확보

- 본 연구에 적용된 전산유체역학 기법을 이용한 육계사 시뮬레이션 모델은 현장 실험을 통한 지역별 온도 자료를 통한 상대 오차 측정 시 바닥으로부터 0.5m 높이에서 0.65%, 2m 높이에서 0.13%의 상대 오차를 보임.
- 3가지 외기 온도 조건 (-5℃, -15℃, -25℃) 및 내부 환경 조건(11일령, 25일령)에 대하여 HRV 환기 시스템을 적용할 경우 기존의 일반적인 강제환기식 육계사 시설에 비하여 전체적 및 지역적으로 균일한 열환경을 보이며 평균 온도의 상승을 통하여 내부 생육 온도 유지를 위한 추가 열원 공급량의 감소를 보임.
- HRV 환기 시스템 적용 계사의 경우 11일령 조건 시 2기의 HRV 환기 시스템의 연속 운전을 실시하며 HRV 환기 시스템 적용 계사의 운영 기준, 예를 들어 요구되는 생육 적정 온도를 기준으로 $\pm 2^{\circ}\text{C}$, $\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\pm 5^{\circ}\text{C}$ (계사 운영자의 온도 허용 범위) 조건에 따라 전산유체역학 시뮬레이션 기법을 이용하여 산출한 난방기 등과 같은 추가 열원의 공급이 추천되는 시각은 환기 시스템 가동 시점으로부터 다음과 같음.

Table 5.1.2. 11일령 조건 시 HRV 환기 시스템 적용 계사의 운영 기준에 따른 난방기 가동 추천 시간 (HRV 환기 시스템이 작동된 시점 이후) (Unit: sec.)

	±2℃	±3℃	±5℃
-5℃	22	27	134
-15℃	16	20	71
-25℃	12	16	22

- HRV 환기 시스템 적용 계사의 경우 25일령 조건 시 HRV 환기 시스템은 연속 운전, 요구 환기량에 따른 잉여 환기량은 강제환기팬 및 입기슬롯의 조합을 통하여 달성되게 되며 이때 전산유체역학 시뮬레이션 기법을 이용하여 계군 내 온도 적정성 등을 토대로 산출한 일반 환기 시스템의 가동 on/off 주기는 다음과 같음.

Table 5.1.3. 25일령 조건 시 외기 온도 대비 운영 기준에 따른 일반 환기 시스템 on/off (Unit: sec.)

Outdoor temp.	ventilation	±2℃		±3℃		±5℃	
-5℃	fan (on)	18	118	22	144	84	548
	fan (off)	100		122		464	
-15℃	fan (on)	13	84	15	98	21	137
	fan (off)	71		83		116	
-25℃	fan (on)	10	66	12	79	15	98
	fan (off)	56		67		83	

- HRV 환기 시스템의 운전은 연속적으로 이루어짐.

- 동절기 크로스 환기팬, 측벽의 입기 슬롯을 이용한 강제환기식 육계사의 11일령 조건 시 운영 지침 별 (생육 적정 온도 ±2℃, ±3℃, ±5℃) 외기 조건 별 환기팬 가동 주기는 다음과 같음

Table 5.1.4. 11일령 조건 시 외기 온도 대비 운영 기준에 따른 환기 시스템 on/off
(Unit: sec.)

Outdoor temp.	ventilation	±2℃		±3℃		±5℃	
-5℃	fan (on)	13	77	15	88	23	135
	fan (off)	64		73		112	
-15℃	fan (on)	10	59	12	71	15	88
	fan (off)	49		59		73	
-25℃	fan (on)	8	47	9	53	12	71
	fan (off)	39		44		59	

- 동절기 크로스 환기팬, 측벽의 입기 슬롯을 이용한 강제환기식 육계사의 25일령 조건 시 운영 지침 별 (생육 적정 온도 ±2℃, ±3℃, ±5℃) 외기 조건 별 환기팬 가동 주기는 다음과 같음

Table 5.1.5. 25일령 조건 시 외기 온도 대비 운영 기준에 따른 환기 시스템 on/off
(Unit: sec.)

Outdoor temp.	ventilation	±2℃		±3℃		±5℃	
-5℃	fan (on)	18	40	21	47	73	162
	fan (off)	22		26		89	
-15℃	fan (on)	13	29	15	34	21	47
	fan (off)	16		19		26	
-25℃	fan (on)	10	23	11	25	14	31
	fan (off)	13		14		17	

제 2 절 연구성과 활용계획

1. 실용화·산업화 계획(기술실시 등)

주관 연구기관에서 실용화·산업화할 계획임.

2. 교육·지도·홍보 등 기술확산 계획 등

하림, 목우촌, 체리부로등 계열화법인을 통해 육계 사육농가에 홍보할 예정임.

3. 특허, 논문 등 지식재산권 확보계획

- 현재 2건의 특허를 작성 중

- 1편의 SCI 논문 작성 중

- “Energy Consumption and Indoor Environment of Broiler Houses with Energy Recovery Ventilators”, submitted, Applied Engineering in Agriculture

- “Effect of Condensation on Performance of Heat Recovery Ventilators for Bloiler Houses”, submitted, Int. J of Air-Conditioning and Refirigeration

- “강제환기식 육계사 다중 입기 슬롯에서의 입기류 도달거리 분석”, 2012, 한국농공학회, 54(2), pp 55-65.

- “Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system”, Biosystems Engineering, 112(2012), pp 293-303.

- “결로해석모델을 도입한 축사용 폐열회수 환기장치의 효율변화에 관한 연구”, 2011, 대한설비공학회, pp 163-166

- “단순화된 결로 해석을 적용한 축사용 폐열회수 환기장치의 수치해석적 연구”, 2011, 대한설비공학회, pp 1040-1043

- “과부하 및 착제상 조건에서 히트펌프 칠러의 난방성능에 관한 실험 연구”, 2011, 설비공학논문집, 23(7), pp 477-482

- “환기시스템 온도조건에 따른 히트펌프 난방성능 실험연구”, 2010, 대한설비공학회, pp 642-647

- “EES를 이용한 히트펌프 성능해석”, 2010, 대한설비공학회, pp 642-647

- “축사용 폐열회수 환기장치의 열교환소자 설계를 위한 수치해석적 연구”, 2010, 대한설비공학회, pp 40-45

4. 추가연구, 타연구에 활용 계획 등

- 본 연구에서 산출한 HRV 환기 시스템 적용 계사 및 강제환기식 일반환기 육계사의 환기 운영 주기는 실험 대상 계사에 적합한 운용방식으로써 이를 일반화 및 보급화 되어 있는 계사 시설을 토대로 동일한 연구 방법론을 적용하면

국내 기후에 적합한 일령별 환기 운영 지침을 제공할 수 있을 것이라 판단됨

- 국내 일반적인 강제환기식 육계사를 대상으로 환경 조건 별 입기류 도달 거리 측정 실험 등을 통하여 국내에 적합한 Jet drop distance 이론식을 도출하고 이를 토대로 동절기 계사 환기 운영 지침을 마련이 가능할 것으로 예상됨
- 이를 위하여 국내 전형적인 강제환기식 육계사 시설의 물리적 특성을 파악하고 이를 데이터베이스 화 하며 각 환경 조건 별 입기류 도달거리 측정을 실시하고 각 실험 변수에 따른 민감도 분석을 통한 가중치를 산정하여 이론식의 신뢰성을 향상시킬수 있을 것이라 예상됨
- 국내 기후에 적합하고 신뢰성이 향상된 새로운 Jet drop distance 이론의 도출을 통하여 실제 육계사 내 실시간 열환경 모니터링 결과를 토대로 이를 이론식에 대입하여 예상되는 입기류 도달거리를 예측하고 해당 영역에 대한 집중 열관리 등이 가능할 것이라 기대됨



Fig. 5.1.2.. Jet drop distance 개념을 이용한 환기 운영 지침 제시 향후 연구 방향 제시

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

해당 사항 없음

제 7 장 연구시설·장비 현황

해당 사항 없음

제 8 장 참고문헌

1. **Zhou, Y.P., Wu, J.Y., Wang, R.Z.**, 2007, Performance of Energy Recovery Ventilator with Various Weather and Temperature Set-points, *Energy and Buildings*, Vol. 39, pp. 1202-1210.
2. ASHRAE, 2000, *ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment*, Chap. 44 Air-to-air Energy Recovery.
3. ASHRAE, 2000, *ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment*, Chap. 43 Heat Exchangers.
4. ASHRAE, 2003, *ASHRAE Handbook HVAC Applications*, Chap. 22 Environmental Control for Animals and Plants.
5. **Hinz, T. and Linke, S.**, 1998, A comprehensive experimental study of aerial pollutants in and emissions from livestock buildings. Part 1: Methods, *J. Agric. Engng Res*, Vol. 70, pp. 111-118.
6. **Kragh, J., Rose, J., Nilesen T.R., Svendsen, S.**, 2008, Quasi -steady-state Model of a Counter-flow Air-to-air Heat-exchanger with Phase Change, *Applied Energy*, Vol. 85, pp. 312-325.
7. **Rose, J., Kragh, J., Rose, J., Nielsen, T.R. and Svendsen, S.**, 2007, New Counter Flow Heat Exchanger Designed for Ventilation Systems in Cold Climates, *Energy and Buildings*, Vol. 39, pp. 1151-1158.
8. **Kragh, J., Rose, J., Svendsen, S.**, 2005, Mechanical Ventilation with Heat Recovery in Cold Climates, *Proceeding of the Seventh Nordic Symposium on Building Physics in Nordic Countries*, Vol. 2, pp. 1-8
9. **Lee, M. Y., Kim, Y. H., Lee, H. S.**, 2010, Air-side Heat Transfer Characteristics of Flat Plate Finned-tube Heat Exchangers with Large Fin Pitches under Frosting Conditions, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 2655-2661.
10. **Han, H., Nam, S., Han, G.**, 2010, Numerical Analysis for Designing Heat Exchanger Element in HRV for Livestock Buildings, *Proceedings of the*

SAREK, pp. 40–45.

11. **Han, H., Nam, S., Han, G.**, 2011, CFD Study of Simplified Method for Condensation Analysis on HRV for Livestock Building, Proceedings of the SAREK, pp. 1040–1043.
12. **Han, H., Nam, S., Han, G.**, 2011, A Study on the Effect of Condensation on the Efficiency of HRV for Livestock Buildings, Proceedings of the SAREK, pp. 163–166.
13. **Simonson, C.J., Besant R.W.**, 1999, Energy Wheel Effectiveness: Part I –Development of Dimensionless Groups, Heat and Mass Transfer, Vol. 42, pp. 2161–2170.
14. **Simonson, C.J., Besant R.W.**, 1999, Energy Wheel Effectiveness: Part II –Correlations, Heat and Mass Transfer, Vol. 42, pp. 2171–2185.
15. **Zaheed, L., Jachuck, R.J.J.**, 2004, Review of Polymer Compact Heat Exchangers, with Special Emphasis on a Polymer Film Unit, Applied Thermal Engineering, Vol. 24, pp. 2323–2358.
16. **Brouwers, H.J.H.**, 1994, Heat Transfer, Condensation, and Fog Formation in Crossflow Plastic Heat Exchangers, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 39, pp. 391–405.
17. **Jeong, K., K., Michael, K., Harun, B., Edward, L.**, 2010, Analytical Modeling of Water Condensation in Condensing Heat Exchanger, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp. 2361–2368.
18. **Jing, L., Hiroyoshi, A., Hitoshi, Y.**, 2004, CFD Prediction of Surface Condensation on Walls and Its Experimental Validation, Building and Environment, Vol. 39, pp. 905–911.
19. **Reynolds, W., C.**, 1979, Thermodynamic properties in SI, pp. 154
20. **Hinz, T. and Linke, S.**, 1998, A comprehensive experimental study of aerial pollutants in and emissions from livestock buildings. Part 1: Methods, J. Agric. Engng Res, Vol. 70, pp. 111–118.

21. **Barrington S. F., and MacKinnon I. R.,** 1990, Air distribution from rectangular wooden ventilation ducts. American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASAE, pp 944-948.
22. **Barrington S. F., and MacKinnon I. R.,** 1990, Mathematical modeling of ventilation duct performance. American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASAE, pp 1329-1335.
23. **Berckmans, D., J. M. Randall, D. Van Thielen, and V. Goedseels,** 1993, Validity of the Archimedes number in ventilating commercial livestock buildings. Journal of Agricultural Engineering Research, pp 239 - 251.
24. **Berckmans D., and Goedseels V,** 1985, Development of a heat exchanger system for modern livestock buildings, Heat Recovery Systems, 5(6), pp 496-481.
25. **Carpenter G. H.,** 1972, The Design of Permeable Ducts and Their Application to the Ventilation of Livestock Buildings. J. agric. Engng Res, pp 219-230.
26. **El Moueddeb K., Barrington S., and Barthakur N.,** 1997, Perforated Ventilation Ducts: Part 1, A Model for Air Flow Distribution. J. agric. Engng Res, pp 21 - 27.
27. **Harms R. G., and Johnson P.D.A.,** 1985, Ventilation Handbook: Livestock and Poultry. Published by the B.C. Ministry of Agriculture and Food Victoria, B.C. CANADA ISBN 0-7726-0372-3.
28. **Hong et al.,** 2008, Numerical simulation of ventilation efficiencies of naturally ventilated multi-span greenhouse in korea, Transactions of the ASABE, pp 1417 - 1432.
29. **Kwon et al.,** 2011, Analysing ventilation efficiency in a test chamber using age-of-air concept and CFD technology, Biosystems Engineering, pp 421 - 433.
30. **Kwon et al.,** 2012, Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation

system, Biosystems Engineering, pp 293 - 303.

31. **Leonard, J. J., and J. B. McQuitty**, 1986, Archimedes number criteria for the control of cold ventilation air jets, Canadian Agricultural Engineering, pp 117 - 123.
32. **Pick R. J., Morey R. V., and Cloud H. A.**, 1990, Airflow distribution from corrugated aeration ducts. American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASAE, pp 1319 - 1326.
33. **Randall, J. M., and V. A. Battams**, 1979, Stability criteria for airflow patterns in livestock buildings. Journal of Agricultural Engineering Research, pp 361 - 374.
34. **Scott N. R.** 1984, Livestock buildings and equipment: a review. J. agric. Engng Res, pp 93-114.
35. **Selders W., Carpenter G. H., Workman D. J.**, 1989, Prototype Broiler House Heat Exchanger Performance. American Society of Agricultural Engineers, Applied Engineering in Agriculture, pp 589-594.
36. **Walker p. N., Galis E. A., Manbeck H. B. and Meyer D. J.**, 1986, Wall Surface Heat Exchanger for Ventilation Air. American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASAE, pp 565 - 570.
38. **Zhang, G., S. Morsing, and J. S. Strom**, 1996, Modeling jet drop distances for control of a nonisothermal flap adjusted ventilation jet, American Society of Agricultural Engineers, pp 1421 - 1431.

주 의

1. 이 보고서는 농림수산식품부에서 시행한 첨단기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림수산식품부에서 시행한 첨단기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.