

소규모 음압터널환기방식 무창자돈사의 최적 환기 요건에 관한 연구

이승주 장동일 Winson M. Gutierrez 박정식 전상훈 조형제 오권영 장흥희

Necessary Conditions for Optimal Ventilation of Small Windowless Piglet House with Negative Tunnel Ventilating System

S. J. Lee D. I. Chang W. M. Gutierrez J. S. Park S. H. Jeon H. J. Cho K. Y. Oh H. H. Chang

Abstract

This study was carried out to determine necessary conditions for optimal ventilation of small windowless piglet house (5.2 (W) × 12.3 (L) × 2.3 (H) m) with negative tunnel ventilating system using CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation. The weaning piglet house for this experiment was consisted of 4 rooms (520 (W) × 300 (L) cm), 3 fences (70 (H) cm), 1 air inlet (350 (W) × 2 (H) cm) and 1 exhaust fan (50 (D) cm), and simulated using CFD code, FLUENT. The simulation results for the original weaning piglet house showed ununiform ventilation for each room. Therefore, to uniformly ventilate all rooms, the heights of the air inlet and first fence were modified to 3 cm and 100 cm, respectively. The simulation result for the modified weaning piglet house showed uniform ventilation for all rooms and the optimum air inlet velocity of 1.4 m/s.

Keywords : Weaning piglet house, Tunnel ventilation, CFD simulation, Air inlet, Fence

1. 서론

경제발전과 함께 돼지고기의 소비가 꾸준히 증가함에 따라 돼지 사육두수가 증가하고 있는데 반하여 양돈가 수는 환경 규제와 사료 원료가의 상승 등으로 인하여 계속 줄어들고 있다. 이에 따라 양돈장의 규모는 양돈가당 사육두수가 증가하여 점차 대형화 및 기업화 되고 있다(NAPQMS, 2007).

돈사형태가 1970년대부터 양돈 규모가 소규모에서 중규모 또는 대규모로 커짐에 따라 저가의 건축비로 건축할 수 있었던 개방돈사에서 고가의 건축비로 건축할 수 있는 무창돈사로 점차 발전되었다. 이러한 무창돈사를 이용함으로써 집약적 양돈이 가능하게 되었을 뿐만 아니라 자동으로 돈사 내부의 환경을 제어할 수 있게 되었다. 그러나 고밀도 사육환경에

의하여 고열, 유해 가스, 먼지 및 병원성 미생물 등이 돈사 내에 집적될 수 있기 때문에 개방돈사보다 환경적인 측면에서 위험 부담이 더 크다. 특히 최근에 무창자돈사와 무창육성돈사에서 환경문제가 많이 발생되고 있다. 여러 환경문제 중에서 가장 문제가 되는 것은 무창돈사 형태와 이들에 적합한 환기방식에 대한 연구가 국내에서 거의 수행되지 않았기 때문에 양돈가에 한국 기후에 적합한 무창자돈사나 무창육성돈사의 설계도면을 제공하지 못하여 양돈장마다 제각각 환기시설을 설계하고 시공함으로써 환기가 불균일하게 되고 있으며, 이로 인하여 호흡기 질병이 다발하고 있고 폐사율이 5~40% 정도로 매우 높게 나타나고 있다(KASV, 2006).

무창돈사의 환기에 있어서 가장 중요한 것은 균일하게 환기하는 것이다. 균일하게 환기가 되지 않고 있는 무창돈사의

The article was submitted for publication on 2008-10-23, reviewed on 2008-11-07, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2008-11-27. The authors are Seung Joo Lee, Ph. D. Candidate and Research Associate, KSAM member, Dong Il Chang, Professor, KSAM member, Division of Bioresources Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea, Winson M. Gutierrez, Research Associate, Jeong Sik Park, Research Associate, Sang Hoon Jeon, Research Associate, Hyoung Je Cho, Research Associate, Hong Hee Chang, Associate Professor, KSAM member, Department of Animal Science, Gyeongsang National University, Jinju, Korea, and Kwon Young Oh, Researcher, KSAM member, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Science, Suwon, Korea. Corresponding author: H. H. Chang, KSAM member, Associate Professor, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea; Fax: +82-55-751-5510; E-mail: <hhcahng@gnu.ac.kr>.

환기 시스템을 검증하기 위한 방법에는 연기를 피우는 방법, 풍속을 측정하는 방법, CFD(Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션을 하는 방법 등이 있다. 이 중에서 CFD는 컴퓨터를 활용하여 해석하고자 하는 대상에 대하여 수치 계산 및 시뮬레이션을 수행함으로써 공기유동형태 등에 대한 결과를 예측·분석할 수 있는 방법이다. 이러한 CFD 시뮬레이션은 온실의 환기해석에 광범위하게 적용될 뿐만 아니라 축사 환기 해석에서도 일부 적용되고 있다(Mistriotis et al., 1997; Bjerg et al., 2002; Yun et al., 2007; Lee et al., 2008).

본 연구는 현재 국내에 보급되어 있는 소규모 음압터널환기방식 무창자돈사의 공기유동에 대하여 겨울철 최소 환기량을 기준으로 CFD 시뮬레이션을 실시함으로써 소규모 음압터널환기방식 무창자돈사의 겨울철 최적 환기를 위한 입기구의 크기와 펜스(fence)의 높이 등을 구명하고자 수행되었다.

2. 재료 및 방법

가. 실험돈사

본 연구에 사용된 소규모 음압터널환기방식 무창자돈사는 그림 1과 그림 2처럼 돈방이 4개 있는 폭 5.2 m, 길이 12.3 m, 높이 2.3 m의 크기로 된 돈사였다. 돈사에서 돈방을 제외한 우측 공간이 작업통로였고, 별도의 탬퍼링 공간은 없었다. 급이방식은 습식급이를 인력으로 실시하고 있었으며, 약 7 kg의 이유자돈들이 입식되어 4주간 사육되었다. 이 무창자돈사의 적정 수용두수는 120두였고, 돈방 사이에 설치된 펜스의 높이는 뜬바닥으로부터 70 cm였다. 정면 벽 200 cm 높이에 폭 350 cm × 높이 2 cm 크기인 입기구와 반대편 벽 중앙 160 cm 높이에 한 대의 배기팬(직경: 50 cm)이 설치되었다. 배기팬에 의해 발생하는 음압에 의해 입기구를 통하여 외부 공기가 유입된 후 4개의 돈방을 가로질러 배기팬을 통하여

외부로 배기되는 음압터널환기방식으로 환기되었다(Fig. 1 and 2). 개선하기 전 무창자돈사에서는 입기구의 크기가 작음으로 인하여 입구기 풍속이 높게 유지되어 입기구 쪽에 위치한 ①번 돈방에는 신선한 외부공기가 거의 떨어지지 않고 대부분 ②번 돈방에 떨어지는 현상이 나타날 것으로 예측되었다. 즉 돈방 바닥으로부터 10 cm 높이의 풍속이 ①번 돈방과 ②번 돈방간에 차이 많이 나고 공기의 질도 다를 것으로 판단되었다. 따라서 표 1과 같이 소규모 무창자돈사의 입기구의 크기와 펜스의 높이를 변경하였으며, 다른 돈사 시설의 경우 변경을 실시하지 않았다.

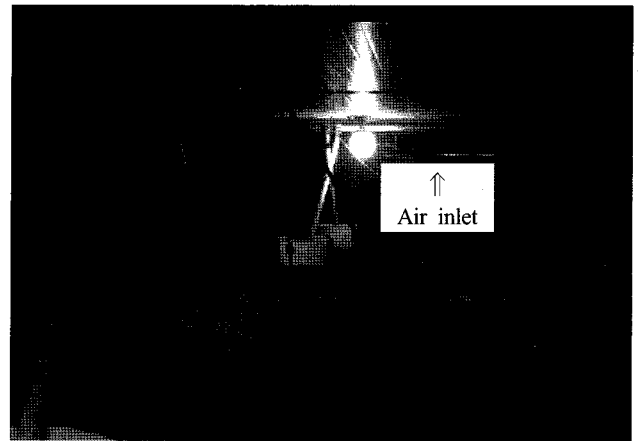


Fig. 1 Photograph of the experimental windowless piglet house with negative tunnel ventilating system.

Table 1 Size of air inlet and height of the first fence for simulation of windowless piglet house

Items	Before modification	After modification
Size of air inlet (cm)	350×2	350×3
Height of the first fence (cm)	70	100

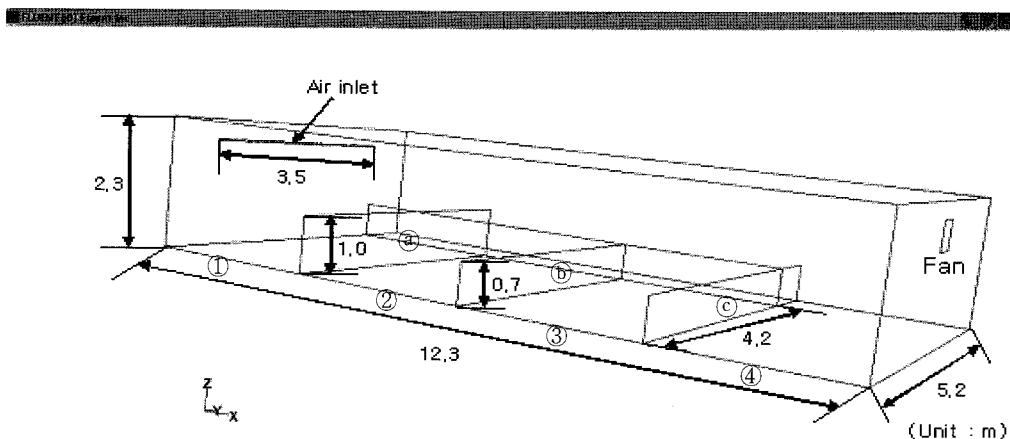


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental windowless piglet house with negative tunnel ventilating system.

나. CFD 시뮬레이션

본 연구에서는 표 2와 같이 실험 돈사에 대한 CFD 시뮬레이션을 실시하였다.

Table 2 Simulation models of windowless piglet house

Simulation models	Size of air inlet (cm)	Height of the first fence (cm)
Type I	350×2	70
Type II	350×2	100
Type III	350×3	70
Type IV	350×3	100

실험돈사의 체원과 동일하게 돈사의 구조를 Gambit(Ver. 2.2, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, U.S.A.)을 이용하여 모델링 하였는데, 틈바닥은 공기유동형태에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단하여 모델링에 포함하지 않았다. 그림 3과 같이 격자망(mesh)의 구성이 CFD 시뮬레이션 시 계산시간 및 계산의 정확도에 영향을 미치기 때문에 입기구와 배기팬 부근에서는 더욱 더 조밀하게 3차원으로 격자망을 구성, 격자의 개수는 약 48만개이었다.

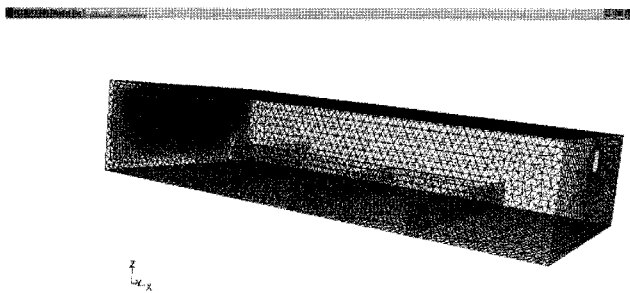


Fig. 3 Mesh made using Gambit.

MWPS-34의 겨울철 권장 두당 최소 환기량(0.0849 CMM/head)에 근거하여 120두를 위한 총 최소 환기량을 계산한 결과 0.1698 m³/s이었으며, 이를 입기구의 면적으로 나누어 입

기구 속도를 계산하였다. 이와 같이 계산한 입기구 속도로 외부 공기가 실험돈사 내부로 유입되는 조건 하에서 실험돈사의 공기유동형태를 분석하고자 Fluent(Ver. 6.2, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, U.S.A.)로 3차원 CFD 시뮬레이션을 실시하였다. 분석된 3차원 시뮬레이션 결과를 토대로 하여 개선 전·후의 틈바닥 위 10 cm 높이에서의 공기유동형태를 분석하여 균일한 환기를 위한 입기구의 크기와 펜스의 높이 등을 구명하였다.

무창돈사의 공기유동형태를 분석 시에 공기유동형태에 대한 풍속의 영향보다는 열부력의 영향이 아주 미미하여 열부력 효과를 제외하였다. 또한 무창돈사 환기에 있어서 가장 중요한 것이 돈방간 차이를 최소화 하는 것, 즉 균일하게 환기 하는 것이기 때문에 시뮬레이션 시에 돼지의 존재 여부가 환기의 전체적 균일성에 거의 영향을 미치지 않으므로 돼지가 없는 상태에서 CFD를 실시하였다. 이때 적용한 난류모델은 표준 k-ε 모델을 적용하였으며, 연속방정식에 나타나는 항들의 이산화에는 PRESTO 스킴을 적용하였고, 해의 수렴기준은 continuity와 velocity의 경우 10⁻³, energy의 경우 10⁻⁶ 이하였으며, CFD 시뮬레이션시에 입력한 사양과 분석모델은 표 3과 같다.

다. CFD 시뮬레이션 모델의 검증

무창자돈사의 공기유동형태 해석을 위해 시뮬레이션을 한 CFD 모델의 타당성과 정확성을 검증하기 위하여 개선 전·후 무창자돈사의 입기구 풍속, 각 Type별 돈방 내 틈바닥 위 10 cm 높이의 풍속을 측정하였다. 이때 사용한 풍속계는 SY-MPM(SUNYOUNG SYSETC Inc., Daejeon, Korea)이었다. CFD 시뮬레이션 결과와 실제 측정 결과를 비교 분석하여 CFD 시뮬레이션 모델을 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

CFD를 이용하여 소규모 음압터널환기방식 무창자돈사에 대하여 공기유동형태를 시뮬레이션한 결과는 그림 4, 그림 5

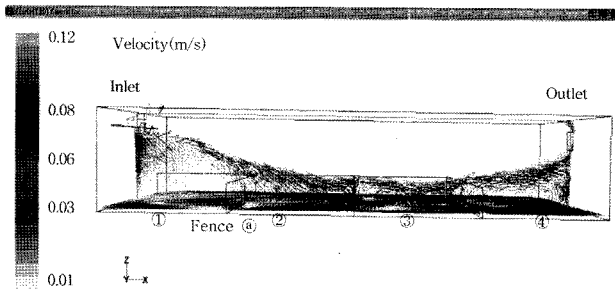
Table 3 Input values and solvers of the CFD model for experimental windowless piglet house

Input conditions and properties		Analysis model	
Property	Value		
Density (kg/m ³)	1.225	Solver	Pressure Based
Cp (Specific heat, J/kg·K)	1006.43	Formulation	Implicit
Thermal conductivity (W/m·K)	0.0242	Time	Steady
Operating pressure (Pa)	101,325	Velocity Formulation	Absolute
Viscosity (kg/m·s)	1.7894e-05	Gradient option	Gree-Gauss Cell Based

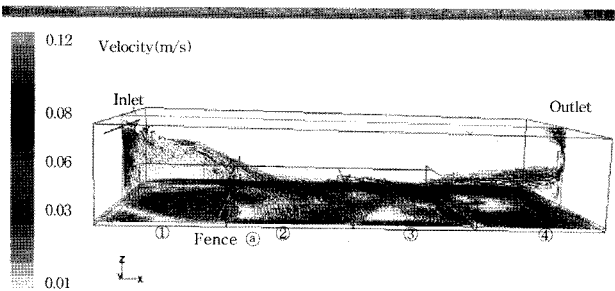
와 같다. 입기구 크기가 350 cm × 2 cm이고 ①번 돈방과 ②번 돈방 사이의 펜스 ③의 높이가 70 cm일 때의 그림 4-a와 입기구 크기가 350 cm × 3 cm이고 펜스 ③의 높이가 70 cm일 때의 그림 4-c를 비교해 보면, 입기구 높이를 2 cm에서 3 cm로 크게 하여 입기구 중앙 풍속을 2.12 m/s 정도에서 1.4 m/s 정도로 저하시킬 수 있었다. 이에 따라 입기구를 통하여

유입된 신선한 외부공기가 ①번 돈방에 좀 더 많이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 입기구 크기가 350 cm × 3 cm이고 펜스 ③의 높이가 70 cm일 때의 그림 4-c와 입기구 크기가 350 cm × 3 cm이고 펜스 ③의 높이가 100 cm일 때의 그림 4-d를 비교해 보면, 펜스 ③의 높이를 70 cm에서 100 cm로 높게 함으로써 입기구를 통하여 유입된 신선한 외부공기가 ①번 돈방과 ②번 돈방 사이의 펜스 ③에 보다 많이 부딪히게 할 수 있었으며, 이로 인하여 입기구를 통하여 유입된 신선한 외부공기가 ①번 돈방에 좀 더 많이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 4-a, 4-b, 4-c 및 4-d를 비교해보면, 입기구 크기가 350 cm × 3 cm이고 펜스 ③의 높이가 100 cm일 때(Type IV), 가장 많이 ①번 돈방에 입기구를 통하여 유입된 신선한 외부공기가 가장 많이 떨어지는 반면에 ②번 돈방에는 상대적으로 적게 떨어지는 것을 알 수 있다. 또한 돈방 바닥으로부터 10 cm 높이 풍속의 분포를 비교해 보면, Type I, II, III 및 IV 중에서 Type IV(Fig. 4-d)가 가장 균일하게 분포하는 것을 알 수 있다. 무창돈사의 입기구 입공기 속도는 3.0~5.1 m/s로 권장되고 있으나(MWPS, 1987), 입기구 크기가 350 cm × 3 cm이고 첫 번째 돈방과 두 번째 돈방 사이의 펜스 높이가 100 cm일 때 입기구 중앙 풍속이 1.4 m/s 정도 되었던 점을 감안해 볼 때 실험돈사처럼 소규모 무창돈사인 경우에는 권장치보다 입기구 입공기 속도가 낮아야 할 것으로 분석되었다. 만약 소규모 무창돈사의 경우 입공기 속도가 높게 되면, 바닥으로부터 10 cm 높이 풍속이 높아져 추위 스트레스를 유발시킬 수 있기 때문이다. 각각의 입기구 중앙 풍속은 시뮬레이션 결과와 실측치가 각각 1.40 m/s, 1.41 m/s로 매우 유사하였다.

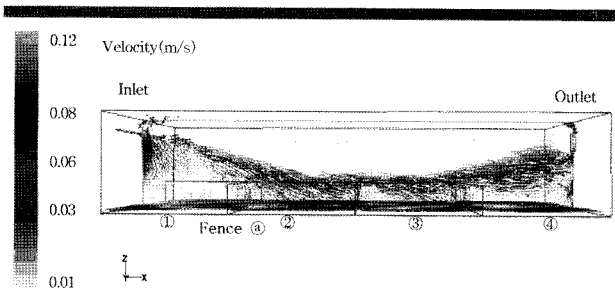
그림 5-a와 그림 5-c를 비교해 보면, ①번 돈방과 ②번 돈방 사이의 펜스 ③의 높이를 70 cm로 유지한 상태에서 입기구 높이를 2 cm에서 3 cm로 크게 하여 입기구 풍속을 저하시킴에 따라 입기구를 통하여 유입된 신선한 외부공기가 첫 번째 돈방에 좀 더 많이 떨어져 돈방 바닥으로부터 10 cm 높이에서의 풍속이 돈방 간의 차이가 매우 적어졌음을 알 수 있다. 그러나 그림 5-c와 입기구 높이를 3 cm로 높임과 동시에 ①번 돈방과 ②번 돈방 사이의 펜스 ③의 높이를 100 cm로 높인 그림 5-d를 비교해 보면, 외부로부터 유입된 공기가 그림 4-d처럼 ①번 돈방에 신선한 공기가 보다 많이 떨어짐에 따라 돈방 바닥으로부터 10 cm 높이에서의 풍속이 좀 더 균일하게 분포하는 것을 알 수 있었다. 이처럼 균일하게 환기가 됨에 따라 불균일한 환기로 인한 호흡기 질병과 추위 스트레스 등과 관련된 문제들이 나타나지 않을 것으로 분석되었다. 돈방 바닥으로부터 10 cm 높이 풍속은 Type I의 경우 0.11 m/s 이하, Type II의 경우 0.11 m/s 이하, Type III의 경우 0.08 m/s 이하, Type IV의 경우 0.08 m/s 이하로 유지되었으



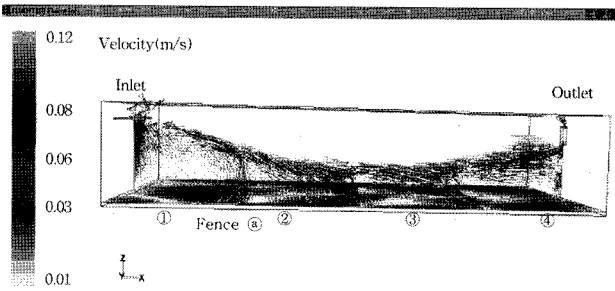
a. Type I: Inlet height = 2 cm, height of ③ fence = 70 cm



b. Type II: Inlet height = 2 cm, height of ③ fence = 100 cm

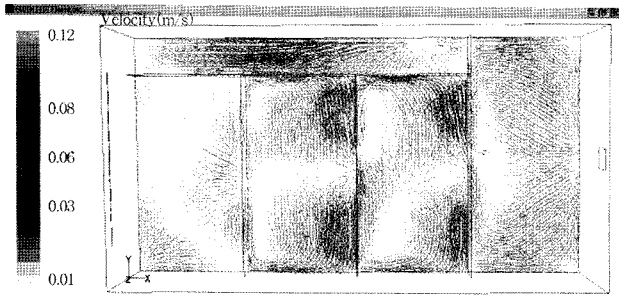


c. Type III: Inlet height = 3 cm, height of ③ fence = 70 cm

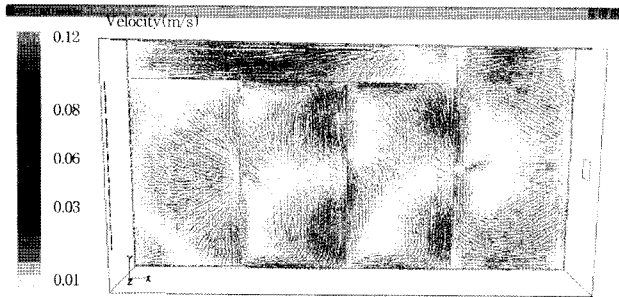


d. Type IV: Inlet height = 3 cm, height of ③ fence = 100 cm

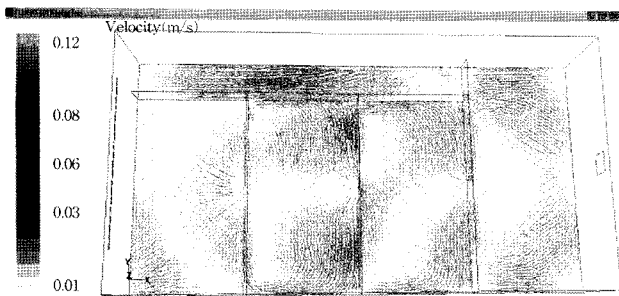
Fig. 4 Predicted air flow patterns in X-Z plane at the center of the experimental windowless piglet house.



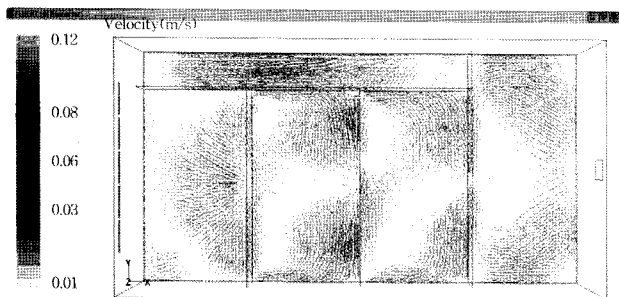
a. Type I: Inlet height = 2 cm, height of ㉑ fence = 70 cm



b. Type II: Inlet height = 2 cm, height of ㉑ fence = 100 cm



c. Type III: Inlet height = 3 cm, height of ㉑ fence = 70 cm



d. Type IV: Inlet height = 3cm, height of ㉑ fence = 100 cm

Fig. 5 Predicted air flow patterns in X-Y plane at 10 cm above floor of the experimental windowless piglet house.

며, 이 모든 풍속이 0.15 m/s 이하이기 때문에 풍속에 의한 추위 스트레스는 발생되지 않을 것으로 판단되었다(Wathes and Charles, 1994). 그러나 추운 겨울에 차가운 입공기가 다른 돈방에 비하여 두 번째 돈방에 많이 떨어져 추위 스트레스를 유발시킬 수 있는 가능성이 높은 점을 감안하여 그림 5-a, 5-b와 그림 5-c, 5-d를 가지고 ②번 돈방에서의 풍속을 비교

해보면, 그림 5-a, b보다 그림 5-c, 5-d에서 낮게 나타났다. 따라서 추위 스트레스 예방하기 위해서는 그림 5-c와 그림 5-d가 유리할 것으로 판단된다. 각 조건 별로 돈방 높이 10 cm의 풍속에 대하여 시뮬레이션 결과와 실측치를 비교하였는데 표 4에서 보는 바와 같이 매우 유사하였다.

Table 4 CFD predicted and measured maximum velocities in piglet rooms (unit : m/s)

Windowless piglet house		Room number			
		①	②	③	④
Type I	CFD	0.05	0.11	0.11	0.08
	Measured	0.06	0.11	0.10	0.07
Type II	CFD	0.06	0.11	0.11	0.10
	Measured	0.05	0.11	0.11	0.08
Type III	CFD	0.03	0.08	0.06	0.05
	Measured	0.04	0.08	0.06	0.05
Type IV	CFD	0.06	0.08	0.06	0.06
	Measured	0.07	0.08	0.07	0.06

이상의 결과들을 종합해 볼 때, 입기구 크기를 350 cm × 2 cm에서 350 cm × 3 cm로 확대하여 입공기 속도를 2.12 m/s 정도에서 1.4 m/s 정도로 저하시키고 ①번 돈방과 ②번 돈방 사이에 있는 펜스 ㉑의 높이를 70 cm에서 100 cm로 높여 입공기가 펜스에 많이 부딪혀 ①번 돈방에 많이 떨어지는 반면에 ②번 돈방에는 적게 떨어지도록 함으로써 균일하게 환기되도록 할 뿐만 아니라 환기효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

3. 요약 및 결론

본 연구는 총 120두의 자돈을 수용할 수 있는 돈방이 4개 있는 폭 5.2 m, 길이 12.3 m, 높이 2.3 m 크기의 소규모 음압 터널환기방식 무창자돈사에 대하여 겨울철 최소 환기량을 기준으로 CFD 시뮬레이션을 실시함으로써 겨울철 최적 환기를 위한 입기구의 크기, 입공기 속도 및 돈방 사이의 펜스 높이 등을 구명하고자 수행되었다. 입기구 크기를 폭 350 cm × 높이 2 cm와 폭 350 cm × 높이 3 cm의 두 수준으로 또한 첫 번째 돈방과 두 번째 돈방 사이의 펜스 높이를 70 cm와 100 cm의 두 수준으로 하여 2×2로 실험을 설계한 후 CFD 시뮬레이션을 하였다. 그 결과에 의하면, 입기구 크기를 350 cm × 2 cm에서 350 cm × 3 cm로 확대하고 첫 번째 돈방과 두 번째 돈방 사이에 있는 펜스를 70 cm 높이에서 100 cm 높이로 높였을 때 첫 번째 돈방에 신선한 입공기가 많이 떨어지는 반면에 두 번째 돈방에는 적게 떨어지는 효과에 의해 환기가

균일하게 되는 것으로 분석되었다. 또한 이 때 입기구의 중앙 풍속은 1.4 m/s 정도로 나타나, 소규모 음압터널환기방식 무창자동사에서는 입공기 속도가 일반 권장치인 3.0~5.1 m/s보다 낮아야 되는 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. Bjerg, B., K. Svidtb and D. Zhang. 2002. Modeling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses. *Computers and Electronics in Agriculture* 34:233-235.
2. Korean Association of Swine Veterinarians (KASV). 2006. Nutritional Approach to Porcine Wasting Syndrome. *Porcine Wasting Syndrome Workshop*. pp.66-68. Korean Association of Swine Veterinarians, Daejeon, Korea.
3. Lee, S. J., W. M. Gutierrez, B. S. Kim, J. Y. Han, D. I. Chang and H. H. Chang. 2008. Study on modification of inside environment in windowless weaning piglet house. *Korean Journal of Environmental and Agriculture* 27(2):150-155.
4. Midwest Plan Service (MWPS). 1987. *Structures and Environment Handbook* 12th ed.. Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA.
5. Mistriotis, A., T. Dejong, M. J. Wagemans and G. P. A. Bot. 1997. Computational Fluid Dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry-A review. *Bioresource Technology* 98:2386-2414.
6. National Agricultural Products Quality Management Service in Republic of Korea (NAPQMS). 2007. *The Korean Agriculture Statistics--The part of Livestock*. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Gwacheon, Korea.
7. Wathes, C. M. and D. R. Charles. 1994. *Livestock Housing*. CAB International, Wallingford, UK.
8. Yun, H. S., J. K. Kwon, H. Jeong, H. D. Lee, Y. K. Kim and N. K. Yun. 2007. CFD Simulation of Airflow and Heat Transfer in the Cold Container. *Journal of Biosystems Engineering* 32(6):422-429. (In Korea)