

풍동 및 PIV를 이용한 CFD 정확도 검증 및 향상

Improvement of CFD accuracy using wind tunnel and PIV system

이인복, 이성현, 김정원, 허정욱

농업공학연구소 생산기반공학과 농업시설공학연구실

I. Lee, S. Lee, K. Kim, J. Heo

National Institute of Agricultural Engineering, Suwon, 441-100

서 론

현재까지 자연환기식 다연동 온실의 환기연구를 위하여 현장실험, 시뮬레이션 등을 이용한 많은 연구들이 수행되어져 왔지만, 효과적으로 환기를 개선할 수 있는 시설구조는 아직 개발되고 있지 않는 실정이다(Lee 등, 2003). 이의 가장 큰 이유는 기존의 자연환기식 다연동 온실들의 각 장단점들에 대한 정확한 비교 분석이 우선적으로 이루어지지 않았기 때문이다. 환기연구를 위하여 가장 보편적으로 수행되는 현장실험의 경우, 자연상태에서는 바람을 인위적으로 제어할 수 없고 많은 정밀기자재와 인력이 요구되어 구조개선 등의 체계적이고 효과적인 연구가 매우 어려운 실정이다. 이를 보완할 수 있는 공학적 신기술은 1990년대 중반부터 공학분야에서 활발하게 이용되어지는 있는 공기유동해석적 접근이 가능한 전산유체역학 (Computational fluid dynamics)이다 (Lee and Short, 2001; Reichrath and Davies, 2002; Lee 등, 2003). 1990년 초부터 컴퓨터의 괄목할만한 발달과 이와 관련된 이론들의 다양화 및 향상 등으로 전산유체역학은 매우 빠르게 강력한 툴로써 발전을 하고 있다. 일반적으로 매우 작은 영역을 대상으로 하는 공학분야와는 달리 농업분야에서는 농업 시설뿐만이 아니라 이의 주위영역까지 포함한 넓은 영역을 대상으로 하기 때문에 조밀한 메쉬를 설계하기가 매우 어렵다. 그러므로, 지역적 중요도에 따라 메쉬의 설계 밀도를 다르게 설계하는 등 메쉬의 크기, 형태 및 배열은 전산유체역학의 신뢰성을 높인데 매우 중요하기 때문에 이의 효율적인 설계가 선행되어야 한다. 또한 난류모델, 열전달모델, 일사량 등 다양한 이론들 중에 농업시설의 환기 연구에 적합한 모델들을 찾는 것도 매우 중요한 작업이다. 또 다른 중요한 사항은 높이별 유속 및 난류 경계층 등 실제적인 환경상태를 최대한 정확하게 시뮬레이션의 입력데이터로 활용하여야 한다는 것이다.

이 연구에서는 우리나라 대표적 자연환기식 다연동 온실들의 환기효율성을 시설구조 및 기후조건에 따라서 정량화하여 비교 분석하고자 한다. 이를 위하여 우선적으로 연구자가 구조별 및 기상별로 다양하게 환경조건을 설정할 수 있는 공기유동해석적 툴(CFD)을 개발하고자 하였다. 이의 검증 및 정확도 향상을 위하여 풍동실험을 수행하였다. 풍동실험은 지난 1세기동안 항공, 우주, 기계, 건축, 토목분야에서 유체해석을 위하여 폭넓게 이용되어져 왔으며, 실제 공기를 가지고 실험을 하기 때문에 가장 신뢰성이 높은 실험기법으로 알려져 왔다 (Lee 등, 2003; Simiu and Scanlan, 1996). 공기유

동가시화에 있어서 1990년대말부터 입자화상처리를 이용한 속도장 측정기술(Particle image velocimetry)등의 발전으로 인하여 풍동실험을 더욱 강력한 실험 툴로써 자리잡게 되었다.

재료 및 방법

가. 실험장비

이번 실험목적을 위하여 이용되어진 실험장비는 풍동, 입자 화상처리를 이용한 속도장 측정기술 (PIV), 그리고 전산유체역학 (CFD)이었다. 각 장비에 대한 자세한 설명은 아래와 같다.

1) 풍 동 (Wind tunnel)

공기가 흐르는 현상이나 공기의 흐름이 물체에 미치는 힘 또는 흐름 속에 있는 물체의 운동 등을 조사하기 위해 인공적으로 공기가 흐르도록 만든 장치이다. 풍동시험은 실물을 사용하여 직접 측정하는 것에 비하여 소형의 모형을 사용할 경우에는 모형을 계통적으로 변화시켜 측정결과를 해석할 수 있으므로 비용이 적게 들어 매우 경제적이다, 쉽고 안전하게 실험할 수 있을 뿐만이 아니라 단시간에 막대한 양의 데이터를 측정할 수 있다. 지난 수세기동안 연구되어온 다양한 상사법칙들을 이용하여 모델 축소 비율에 따라서 공기 유동특성들을 정확하게 보정하는 것이다. 농업공학연구소의 풍공학실험실은 2002년 10월말에 완공을 하였으며, 국내 농업분야에서의 연구를 위한 최초의 풍동이다

2) 속도장 측정기술 (PIV)

지금까지의 대부분의 유동장 해석 연구는 컴퓨터를 이용한 수치해석에 의해 수행되었으며, 컴퓨터 용량이 증가함에 따라 공간분해능력이 향상되고 계산시간이 크게 단축되었으나, 비교할 실험결과가 없어 정확도 검증에 어려움이 따르고 있다. 또한 실험적 연구에 있어서 열선유속계 등과 같은 기존의 점측정 (point-wise measurement)방법들은 국부적인 몇몇 위치에서의 속도나 압력 값을 제공하고 있다. 하지만, 유동가시화는 전달현상(transport phenomena)과정을 가시화하는 것으로, 대부분 비접촉 방식으로 유동 자체를 교란시키지 않으면서 어떤 순간의 전체 유동장을 가시화함으로써 측정하고자 하는 유동에 대한 공간적인 유동정보를 제공한다.

3) 전산유체역학 (CFD)

유동의 문제를 해석하는 방법에는 크게 3가지가 있다. 실험에 의한 방법, 이론적인 해석법, 수치해석적 방법 등이다. 그 중에서 수치해석적 방법은 오늘날 컴퓨터의 발달과 더불어 가장 각광 받는 방법이다. 이러한 컴퓨터를 이용한 수치해석적 방법을 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 이라고 한다. 수치 해석적 방법은 실험적 방법과는 달리 축소된 모델에 의존할 필요가 없으며 많은 비용과 시간이 드는 실험방법들보다 빠르고 경제적인 장점이 있다. 컴퓨터가 지난 수십 년 동안 눈부신 발전을

해왔듯이 전산유체분야도 컴퓨터의 성능향상에 힘입어 비약적인 발전을 해왔으며, 컴퓨터의 성능이 발달될수록 더욱더 정확하고 빠른 결과를 보여줄 수 있는 잠재력이 큰 학문이다.

결과 및 고찰

풍동실험에서 격자와 블록을 이용하여 20~30m 높이의 경계층을 설계하고자 하였다. 이번 실험을 통하여, 양질의 경계층을 설계하기 위하여 적정 격자와 측정지점 사이의 적정거리, 블록의 배치, 격자의 각 각목의 폭, 각목간 거리 등을 찾고자 하였다. 일반 공학분야의 풍동실험에서 경계층설계를 위하여 많이 이용되어지는 스파이와 블록은 농업분야에서의 연구에는 적합지 않은 것으로 나타났다. 특히 20~30m에서의 난류강도를 증가시키는 것은 매우 불가능한 것으로 나타났다. 이번 연구에서는 교량의 진동실험 등을 위하여 많이 이용되어지는 격자판을 이용하여 경계층을 설계하고자 하였다. 유속 및 난류경계층 설계에 대하여 Lee 등 (2004)에서 자세한 설명이 제시되어 있다.

아래 그림에서는 마노메타에 의하여 측정되어진 공기유속과 PIV의 결과를 비교하여 본 것이다. 마노메타센서와 열선풍속계를 정확하다고 가정하였을 때, 최종적인 PIV의 결과는 대부분 1% 미만의 오차를 보였으며, 그림 1에서 보여 주듯이 최대 오차는 2.7% 발생하였다. 마노메타와 열선풍속계의 오차는 최대 0.5% 미만이었다.

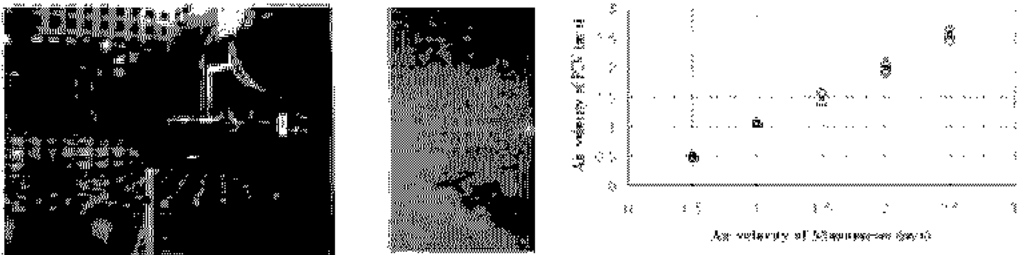
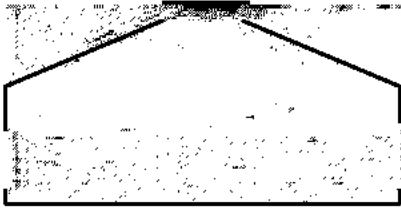


그림 1 PIV시스템 정확도 측정실험

풍동실험을 통하여 측정된 PIV공기유동 데이터를 이용하여 CFD모델의 정밀도를 분석하고 이의 정밀도향상을 도모하고자 하였다. 공기유동장의 정밀도 분석 시, 비교 및 분석대상은 크게 공기유동장 경향(특히, 주요 소용돌이 중심점), 유속분포, 그리고 난류분포로 분류되었다. PIV결과 중에 시설내 바닥이나 지붕 가까이에는 레이저의 빛이 강하게 반사되어 이미지에 많은 노이즈들이 발생하였기 때문에, 표면 가까이에서의 유동장 측정은 불가능하였다.

a) CFD 유동장



b) PIV 유동장

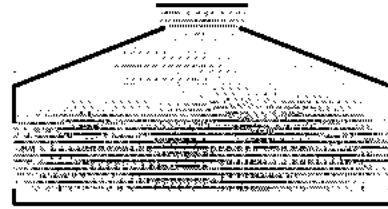


그림 2 Reynolds stress 난류모델의 적용시 자연환기식 단동형 와이드스팬형 온실내 CFD와 PIV 공기유동장 비교

내부유동장 분석 시, Reynolds stress 난류모델과 RNG $k-\epsilon$ 난류 모델이 가장 정확한 결과를 만들었다. PIV와 CFD 공기유동장의 중심점은 계사 중앙에서 풍상측으로 치우친 위치에 형성되었으며, 중심점은 매우 유사한 위치에 형성되었음을 보여주고 있었다. 또한, 계사내 풍하측 지붕아래에서 공기유동장이 분리되는 지점이 CFD유동장에서의 위치와 PIV유동장에서의 위치가 매우 유사한 것을 보여주고 있다. 온실내 중앙에서 수직으로 분포된 공기유속의 평균을 비교하여 보면, Reynolds stress 난류모델을 이용하였을 때 2.4%의 오차가 나타났으며, 수직분포 중에 하단부의 유속이 가장 높은 곳에서의 유속 오차는 약 7.6%인 것으로 나타났다. RNG $k-\epsilon$ 난류 모델도 Reynolds stress 난류모델을 이용하였을 때와 비교하여 약간 큰 오차를 보여주었지만, 전체적인 평균오차는 거의 유사한 것으로 나타났다.

인용문헌

1. Lee, I. and T. H. Short. 2001. Verification of computational fluid dynamics temperature simulations in a full scale naturally ventilated greenhouse. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 44(1), pp119-127
2. 이인복, 최규홍, 전종길, 김경원. 2003. 농업적 풍동이용 기술. 한국풍공학회 2003년도 학술발표회, 201-205
3. Lee, I., C. Kang, J. Jeun, G. Kim, A. Robertson, and S. Sase. 2004. Development of vertical wind and turbulence profiles of wind tunnel boundary layer. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (심사중)
4. Reichrath, S. and T. Davies. 2002. Using CFD to model the internal climate of greenhouses: past, present and future. Agronomie, 22:3-19
5. Simiu, E. and Scanlan. 1996. Wind effects on structures. John Wiley & Sons