

# 농업분야에서의 전산유체역학 활용의 세계적 동향

## Trend on CFD Application in Agriculture



이 인 복  
 서울대학교 농업생명과학대학  
 조경/지역시스템공학부  
 iblee@snu.ac.kr

### 1. Introduction

CFD (Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학)은 열 또는 유체 유동으로 인한 공학 전 분야에 걸친 시스템의 설계, 개발 분야에 컴퓨터를 응용하는 해석 (MCAE) 기술로서, 컴퓨터를 이용한 가상 시험(시뮬레이션)을 통하여 개발기간 단축, 비용절감, 결과 신뢰도 향상 등을 수행하는 것이다. 공학분야에서 시스템 설계에 CFD 도입으로 인한 정량적인 각종 성과는 다음과 같다. 과거 제품개발에 소요되는 시간을 26% 감축하고, 제품의 신뢰도가 약 25% 향상되었다는 것은 매우 엄청난 긍정적 결과라고 할 수 있다.

29% creating more functional products

26% faster time to market

25% creating more reliable products

18% reducing product costs (CIMDATA, 2009)

특히 항상 변화무쌍하며 예측이 불가능한 자연상태에서의 온전한 연구가 불가능한 농림수산식품분야에서는 더욱 이러한 시뮬레이션 기술들의 활용이 요구되고 있다. 이를 통해서 수많은 환경조건들을 모두 고려한 조합들에 따른 경우 수들을 모두 시도함으로써 연구자나 기술자가 연구목표에 부합하는 환경조건들을 마음껏 시도할 수 있다. 이를 통하여 도출되는 엄청난 데이터들은 다양한 분석방법이나 이론들에 적용함으로써 연구 목적을 비용, 시간, 노동력 절감을 통하여 효율적으로 달성할 수 있으며, 수많은 경우 수들을 모두 시도해 보고 그를 통하여 연구자가 원하는 최적의 결과를 도출함으로써 결과의 신뢰도 향상을 도모할 수 있다. 당연히 이를 위해서는 CFD 모델링의 신뢰도 향상을 위한 검증 단계가 우선적으로 요구된다.

이번 분석의 목표는 농업분야에서 CFD 활용이 얼마나 활발하게 이루어지고 있고 또 농업의 어떤 분야들에서 이용되고 있는지 분석하고자 한다.

## 2. 전산유체역학(CFD)이란?

전산유체역학은 유동현상을 묘사하는 보존방정식(또는 확장된 형태의 보존방정식)을 수치적 이산화 및 컴퓨터를 이용하여 계산함으로써 유동현상을 해석, 설계 또는 발견하는 학문이다. 17세기 접어들어 뉴턴 역학에 기반하여 물리현상을 해석하기 시작하면서, 이후 Euler 등에 의해 유동현상을 수학적으로 기술하려는 시도가 이루어졌다. 하지만 현대적 의미의 유체역학 시발점은 20세기 초에 접어들어 Prandtl, Von Karmann 등에 의하여 고속 유동현상을 정밀하게 기술할 수 있는 이론이 정립되기 시작하면서라고 볼 수 있다. 방법으로 해를 구하는데 명확한 한계가 있다. 한 예로, 점성유동의 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식에 대한 존재성 및 유일성은 지금까지도 증명되지 못한 수학적 난제 중에 하나이다. 1970년대 이후 컴퓨팅 환경이 급격히 발달하면서, 수치적인 방법으로 지배 방정식의 해(또는 유동현상의 해)를 구하고자 하는 전산 유체역학 분야에 대한 관심이 고조되면서 본격적인 연구가 시작되었다. 초기에는 컴퓨터의 성능 한계로 근사화된 스칼라 방정식을 해석함으로써 유동을 묘사하였으나, 1990년대 이후 컴퓨팅 성능의 경이적인 발전에 힘입어 오늘날은 3차원 형상 주위 유동장에 대해서 Navier-Stokes 방정식 등을 계산하여 유동현상을 분석할 수 있게 되었다.

현재 학계에서는 CFD를 이용하여 다양한 이슈들에 대한 심도 있는 연구가 진행되고 있으며, 그 결과들은 직간접적으로 연구소 및 산업체에서 유체 기기 관련 제품/시스템의 성능분석, 설계 및 생산에 다양하게 응용되고 있다.

## 3. CFD 활용 현황

### 가. 분석 방법

전체 공학분야에서와 농림수산식품분야 관련 연구에서 CFD의 활용도를 분석하기 위하여, 이 기술을 이용한 학술 논문들을 통계적으로 분석하여 예측하고자 하였다. 우선 CFD라는 키워드를 이용하여 논문 검색을 실시하였으며, 농림수산식품분야는 지난 1995년도부터 게재된 논문들을 찾고자 하였다.

국내외적으로 모든 학술지들을 검색하는 것은 너무나 많은 시간과 인력이 요구되기 때문에, 이번 분석에서는 Science Citation Index (SCI)에 포함되어 세계적으로 권위를 인정받고 있는 약 6,500여 학술지를 대상으로 검색 및 분석을 시도하였다. 먼저 CFD라는 키워드를 가지고 있는 SCI 게재논문을 검색하였으며, 그 다음에는 이를 농림수산식품분야로 좁혀서 관련 논문을 찾고자 노력하였다. 현실적으로 농림수산식품분야의 CFD를 활용한 연구들을 분리하여 낸다는 것은 매우 큰 어려움이 있어서, 농업공학분야의 대표적인 SCI 학술지들을 우선적으로 선택하고자 하였으며, 이를 통해서 선택된 대표적인 농업공학관련 학술지는 표 1에서 보여주는 바와 같다.

CFD가 활용되어진 농림수산식품 관련분야의 연구를 크게 대표적으로 7개 분야를 선정하였다. 건물(Building)이란 대표적인 농업생산시설인 온실, 축사 등을 포함하며, 기계(Machine), 시설 밖 대기환경(Atmosphere), 식품(Food), 물(Water), 토양(Soil), 그리고 에너지(Energy)로 분류하였다. 표와 같이, 대표적인 4개 농업공학 관련 학술지 이외에도 각 분야별로 농림수산식품 관련 CFD 활용 연구들이 많이 소개된 각 분야의 대표적인 저널들도 CFD 키워드를 이용하여 추가로 검색하였다. 에너지 분야는 대상이 너무 광범위하고

표 1. 농공학 대표 SCI 저널 및 농림수산식품 총 7개 분야별 대표 SCI 저널

Field	4 major journals	Journals added
Atmosphere	Computers & electronics in Agriculture	Agricultural and Forest Meteorology Boundary-Layer Meteorology Atmospheric Environment
Buildings		Agricultural and Forest Meteorology Boundary-Layer Meteorology Atmospheric Environment
Energy	Biosystems Engineering	
Food	Transactions of ASABE	Journal of Food Engineering International Journal of Refrigeration
Machine		Boundary-Layer Meteorology Atmospheric Environment Journal of Food Engineering
Soil	Applied Engineering in Agriculture	Boundary-Layer Meteorology
Water		Journal of Hydrology

그것을 농림수산식품분야로 분류하는 것이 불가능하여서, 이 연구에서는 요즘 대표적인 3세대 바이오에너지인 미세조류 관련 게재논문을 검색하고 이를 분석하였다.

이들 검색 결과들을 이용하여, 지난 일정 기간 동안 CFD 관련 논문 수 증가 추세, 각 분야별 논문 수 변화, 7개 대표적 분야별로 CFD 활용 대상, 대표적 검증 방법 등을 분석하고자 하였으며, 이들을 통해서 현재 우리 농림수산식품분야에서의 CFD가 어떻게 활용되어지고 있고 또한 어떠한 긍정적인 효과를 창출하고 있는지를 예측해 보고자 하였다.

#### A. 전분야에서의 CFD 활용

우선 전체 학문 분야에서 CFD의 활용도를 알아 보기 위하여, SCI 게재논문들 중에 CFD 키워드를 가지고 있는 논문들을 검색 후 분석하였다.

그림 1에서 보여주듯이, CFD 키워드를 포함한 논문 수는 총 16,056편이었으며, 최초 논문은 1962년도에 게재되었다. 1990년도에 들어서면서 게재논문수가 급격

히 증가하는 것을 보면, CFD를 이용한 연구들이 1990 년대에 들어서면서 본격적으로 활발해 진 것을 예측할 수 있다. 1992년도부터 게재된 총 논문 수는 15,945편 이며, 올해 2012년도에도 6월까지 이미 921편이 게재되었다. 이는 지난 20년간 평균 증가율이 3,000% 이상으로 매우 급격히 증가함을 알 수 있으며, 이러한 CFD 활용 연구는 앞으로도 더욱 활발해 질 것으로 판단된다.

CFD의 활용 분야는 대표적으로 기계학 (Mechanics), 열역학 (Thermodynamics), 에너지 (Energy), 컴퓨터 과학 (Computer Sciences), 물리학 (Physics), 재료과학 (Materials Science), 수학 (Mathematics), 건설공학 (Building Construction), 화학 (Chemistry), 환경생태 공학 (Environmental Sciences Ecology) 등이 선도하고 있으며, 약 30개 정도의 공학 및 과학의 대표적 분야에서 활발하게 도입 및 활용이 되고 있다.

그림 2의 그래프는 각 나라별로 CFD가 활용된 논문 발표 수를 보여주고 있다. 총 논문 중에 약 22.6%의 논문이 미국에서 만들어졌으며, 그 다음으로 영국

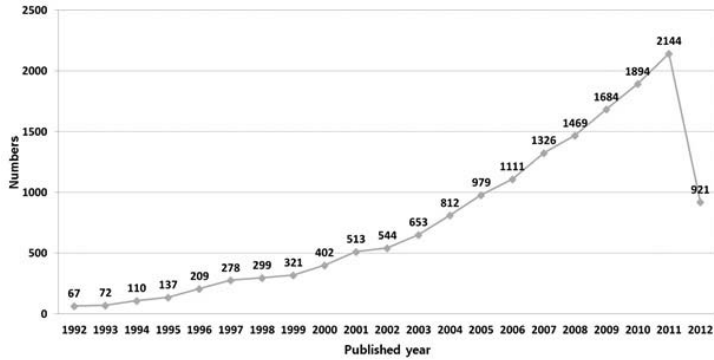


그림 1. CFD 키워드를 포함한 SCI 게재논문 수 (2012.6)

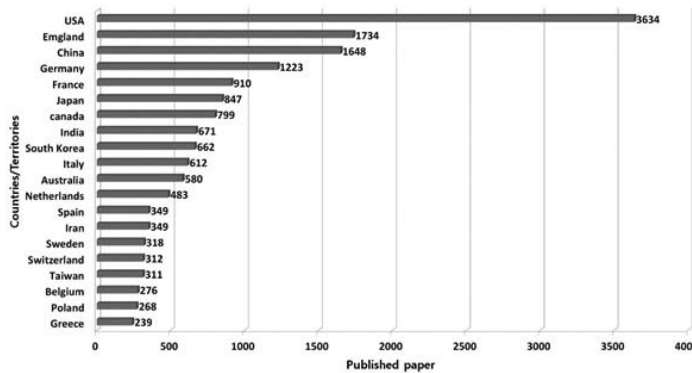


그림 2. 각 나라별 SCI 게재논문 수 (2012. 6)

(10.8%), 중국 (10.3%), 독일 (7.6%), 프랑스 (5.7%), 일본 (5.3%)이 뒤를 따르고 있다. 우리나라도 9번째로 CFD 관련 논문이 많이 나오는 것으로 나타났으며, 총 논문 수에서 약 4.1%를 차지하고 있다.

#### B. 농림수산식품분야에서의 CFD 활용

세계적으로 농림수산식품분야 관련 첫 번째 CFD를 활용한 논문은 1992년도에 처음 나온 것으로 나타났다. 이 이후로 지난 20년동안 4개 주요 농업공학관련 학술지에는 총 228편의 논문이 나왔으며, 2000년 이후에 컴퓨터의 괄목할만한 발전과 CFD 관련 프로그램들의 다양한 응용기술들이 개발됨으로써 급격하게 논문 수가

증가하는 것을 알 수 있다. 2012년도에 총 40편의 논문이 게재되었다. 각 학술지별로 게재된 논문 수를 보면, Computers & Electronics in Agriculture, Biosystems Engineering, Transactions of ASABE, Applied Engineering in Agriculture에 각각 19%, 37%, 41%, 그리고 3%를 차지하고 있다. 총 게재논문 중에 약 54%의 논문이 건물 즉 온실, 축사 등 농업생산시설의 환경조절 특히 환기 및 가스 확산 관련 연구들이었으며, 그 다음으로 기계와 대기환경 관련 논문이 각각 29%와 9.7%를 차지하였다.

각 분야별 모든 대표 학술지들을 함께 고려한다면, 총 논문 수는 449편이었고, 대기, 건물, 기계, 식품, 토양,

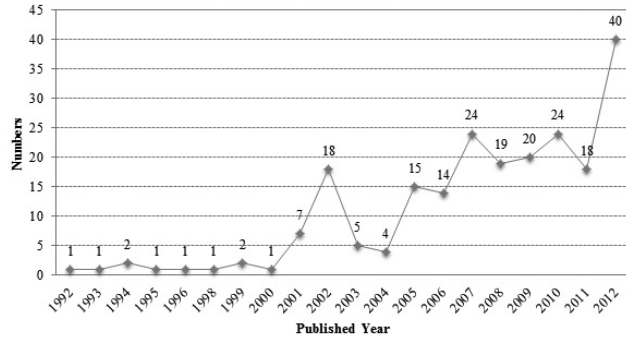


그림 3. 지난 20년간 농업공학 대표 SCI 저널에 게재된 CFD 논문수 (2012.12)

물, 에너지 관련 논문 수는 각각 151, 131, 81, 61, 10, 8, 그리고 7편이었다. 이는 대기환경과 건물환경이 각각 42.1%와 36.7%를 차지하는 것으로 나타났다.

아래 표는 가장 논문수가 많은 분야인 대기환경, 건물 내 환경, 기계, 그리고 식품분야에서의 CFD를 이용한 분석 대상을 보여주고 있다. 농업시설의 경우 총 논문 수 139편 중에서 온실, 축사, 저장시설 관련 연구 논문은 각각 54%, 20%, 그리고 12%를 차지하고 있다.

온실의 경우 약 73%와 3%의 논문이 각각 자연환기와 강제환기 연구를 소개하였고, 반면에 축산시설 연구에서는 각각 48%와 35%로 오히려 강제환기 연구에 CFD 기술이 더 많이 활용된 것으로 나타났다.

표 2. 농림수산식품 각 연구분야별 CFD 관련 게재논문 수 및 연구 주제

Research	Topics			
Atmosphere	Dispersion	Disease	Windbreak	etc
	126	3	8	13
Building	Greenhouse	Livestock house	Storage	etc
	75	28	16	20
Machine	Nozzle& spray	Machine design	Food	etc
	37	8	6	22
Food	Ventilation	Heating	Cooling	etc
	5	34	32	3

대기환경에서 총 84%를 차지하는 확산 관련 연구에서 가스, 에어로졸, 축산악취가 각각 59, 32, 그리고 4편이 있는 것으로 확인되었다. 식품분야에서 Heating의 대표적인 분석 대상은 Drying (7), Cooking (8), Sterilisation (16), Defrosting (7)이었으며, Cooling에서는 Refrigeration (15), Cold storage (14), Chilling (2)인 것으로 나타났다.

에너지 분야에 CFD 활용도는 미세조류 (Microalgae) 관련 게재 논문들을 검색 분석하였는데, 총 논문 수는 총 21편으로 나타났다. 2000년도 중반까지는 주로 미세조류 생육시설인 광생물반응기 내의 유체 흐름을 CFD를 이용하여 분석을 하였었는데, 그 이후부터는 광생물반응기 내부의 혼합 효율성 분석을 활발하게 시도하였고 2010년도 이후에는 약 3편의 논문에서 미세조류의 성장모델을 CFD 메인 모듈에 연동하여 광생물반응기의 효율성 향상을 정량적으로 평가하고자 노력하였다.

CFD 결과에 대한 신뢰도 향상을 위해서는 필수적으로 검증 과정이 꼭 필요하다. 이를 통하여 정확도 향상을 위한 노력이 이루어져야 하며, 또한 각 연구에 CFD 활용 시에는 꼭 서두에 이 모델의 정확도가 얼마라는 것을 제시하고 CFD 결과들을 이용한 연구 결과나 분석을 제시하는 것이 옳은 길이다. 1990년대만 하더라도 CFD

모델의 검증을 시도하는 논문이 많지 않았었지만, 2000 년대에 들어와서는 검증 내용이 포함된 논문이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었다.

이 논문에서는 온실 관련 연구에서의 검증 과정에 대해서 분석하여 결과를 제시하고자 하였다. 총 온실 관련 논문은 75편인데, 이중에 35편만이 연구에 활용한 CFD 모델의 검증 작업 결과를 제시하였다. 이중에 풍동실험이나 축소모형을 이용하여 검증작업을 수행한 연구는 약 17%를 차지하였고 77% 이상이 온실에서의 현장실험을 통하여 검증 작업을 수행하였다. 나머지 6%에 포함되는 연구에서는 양쪽 모두를 수행한 것으로 나타났다. 검증 작업을 위한 분석 대상은 온실 내 온도분포, 온실 내 공기 기류나 공기 유속, 환기량 순으로 가장 많이 나타났다으며, 약 31%의 연구에서는 2개 이상의 분석 대상을 함께 검증 작업에 활용하였다.

#### 4.현황 및 전망

지난 반세기 동안 CFD 분야는 비약적인 발전을 이룩하였으며, 현재 산업 및 연구현장에서 실험의 상당 부분을 대체하여 활용되고 있다. 앞으로 컴퓨팅 기술 및 성능이 지속적으로 발달함에 따라서, CFD의 활용 범위는 점점 증가할 것으로 전망된다. 이를 위해서는 다음과 같은 추진 전략을 통해서 CFD기술이 농림수산물식품 분야에서 활용되어야 할 것이다.

1) 지금도 CFD 기술의 신뢰도는 새로운 프로그램 모델 개발과 컴퓨터 공학의 지속적인 발전으로 엄청나게 계산의 정확성/강건성이 향상되어오고 있지만, 이들과 함께 사용 편의성 및 접근성도 더욱 개선되어야 할 것이다. 현재 CFD 기술은 3차원 복잡한 형상 주위의 와류 특성이 강한 유동이나 충격파-경계층-와류의 상호작용

을 동반하는 비정상유동을 해석하는데 한계를 보이고 있다. 최근에는 이를 극복하기 위하여 FVM과 FEM의 장점을 결합하여 연속적인 유동 영역에서 3차 이상의 공산/시간 정확도를 유지하면서도 불연속적인 유동 구간에 대한 수치적 안정성을 보장할 수 있는 고차 정확도 수치 알고리즘에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. Meshless, OpenFOAM 등과 같은 새로운 기술들도 사용 편의성 및 접근성을 더욱 다양하고 용이하게 할 수 있다고 판단된다.

2) CFD 기술에 대한 심도 있는 활용을 위해서는 일반적으로 유동 현상에 대한 이해뿐만 아니라 수치해석 과정에 대한 상당한 지식을 필요로 한다. 또한 계산 규모에 따라서 보다 많은 컴퓨팅 리소스를 요구하게 되며 슈퍼 컴퓨터와 같은 고가의 장비를 필요로 하게 된다. 그 결과 비전문가가 CFD를 사용하는데 적지 않은 어려움에 처하기도 한다. 이러한 문제점은 현재 급속히 발달하고 있는 IT 기술과 CFD를 접목할 경우 일정 부분 해결이 가능할 것으로 판단된다. 전문 CFD 구성요소들을 통합하고, 이를 웹 기반 협업 서비스로 제공할 경우 편의성 및 접근성을 크게 향상시킬 수 있으며, 특히 여러 곳에 분산된 계산 및 인적 자원을 인터넷 환경을 통하여 하나로 묶고 관련 정보를 활발하게 활용함으로써 효율적인 연구 환경 구축이 가능할 것으로 판단된다. 이를 위해서는 이와 관련된 교육 및 훈련을 통해서 후진 양성에 더욱 박차를 가해야 한다.

3) 설계한 CFD 모델을 이용하여 원하는 결과를 얻고자 할 때에는 우선적으로 검증 작업을 통해서 모델의 정확도 향상 및 이를 통한 결과의 오차를 정확히 제시할 수 있어야 한다. CFD 프로그램에는 각 대상 활용 분야에 따라서 결정하여야 할 많은 기술들과 이론들이 포함되어 있다. 이들의 최적에 조합을 찾기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하지만, 공학도로서 신뢰도 있는 결

과를 얻기 위해서는 꼭 거쳐야 할 필수적인 단계이다. 가장 우선적으로는 연속체로 가정한 유체입자 집합들을 어떻게 컴퓨터 상에서 계산이 가능하도록 이산화하는가이다. 또한 다양한 난류모델들 중에서 최적 모델을 찾는 것도 매우 중요한 작업이며, 대부분의 모델들은 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes)에 기반한 모델들이다. 이 기본 유체역학적 모델들과 동시에 연산할 수 있는 질량전달, 화학반응, 열전달 등과 같은 방정식들도 함께 고려되어야 한다.

4) 국내외 협력 강화도 매우 중요한 부분이다. 앞에서 설명하였듯이, 2000년 들어와서 전 공학분야만이 아니라 농림수산식품 분야에서도 CFD의 활용 연구들은 더욱 활발해지고 또한 새로운 응용분야들이 적극적으로 발굴되고 있다. 국내외 CFD 연구자들이 서로 의견을 교환하고, 질문과 답변을 나누고, 또한 새로 개발한 모듈들을 서로 공유하는 등 국내외 협력을 강화함으로써 시간과 노력을 효율적으로 운영할 수 있으며, 새로운 젊은 연구자들이 이 분야에 기술과 이론들을 빨리 습득하고 연구의 질을 더욱 발전시킬 수 있는 기회가 제공될 수 있다.

5) 세계적으로 많은 CFD 연구자들이 아직도 상용화 프로그램만 이용하고 그 결과들만 연구에 활용하는 경향이 있다. 하지만, 현재 상용 CFD 프로그램들이 모든 분야의 이론 등을 포함하지는 못한다. 예를 들어서, 온실이나 축사시설환경에서 가장 중요한 핵심대상 중에 하나는 시설 내에 있고 또 시설의 존재 필요성의 대상인 작물이나 동물들이다. 주위 환경과 이들의 물리적 및 생리적 상호 반응은 환경조절에서 매우 중요한 대상이지만, CFD 상용 프로그램에는 이들을 모델링할 수 있는 모듈은 전혀 없다. 연구자들이 이들의 이론들을 이용한 모듈들을 설계 및 개발하고 이들이 CFD 메인 모듈과 연동하여 실시간으로 연산할 수 있는 설계가 이루어진다

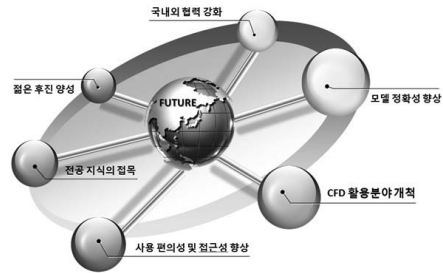


그림 4. CFD 응용분야 발전을 위한 추진 전략

면, 농림수산식품 분야에서 CFD 모델링의 신뢰도 향상 및 의미 있는 결과들을 산출해 낼 수 있다. 또한, 단지 CFD 연산 데이터와 이미지들만 가지고 연구에 활용하는 것보다, 앞으로는 이들 방대한 데이터들을 다양한 이론 및 기술 등에 활용하여 더욱 고차원적인 데이터 양상에 활용하고자 하는 노력들이 필요하다.

6) 연구 대상인 실제 상황, 즉 현장에 대한 이해가 없이 CFD 모델링 작업을 수행하는 것은 연구자로서 매우 무책임한 접근 방법이며, 결과의 신뢰도 향상에 치명적인 악영향을 미칠 수 있다. 모델 결과의 신뢰도 확보를 위해서는 현장실험을 통하여 해결해야 할 문제점들이 정확히 무엇인지, 그리고 이를 보완하기 위한 방법들을 공학적으로 고민할 수 있는 노력이 필요하다. 앞으로 농림수산식품 분야에서 CFD의 활용분야를 더욱 다양하게 개척할 필요가 있다. 항상 변화하고 예측이 불가능한 자연상태가 고려되어야 하는 농림수산식품분야에서는 더욱 이러한 노력들이 필요하며, 이들을 통해서 현장실험의 한계를 극복하고 다양한 구조적 및 환경적 조합들의 영향을 시도해 볼 수 있고, 이를 통해서 도출된 최적 모델은 연구 결과의 신뢰도를 크게 향상시킬 수 있다. 위에서 서술된 농림수산식품분야에서의 CFD 활용 관련 설명에서도 알 수 있듯이, 다양한 분야에서 다양한 연구목적들을 위하여 CFD를 활용한 다양한 접근들이 이루어지고 있는 것을 알 수 있다.

기획: 강문성 [mskang@snu.ac.kr](mailto:mskang@snu.ac.kr)