

# 농약 살포 드론의 노즐 유동 특성 및 시뮬레이션

## Nozzle Flow Characteristics and Simulation of Pesticide Spraying Drone

강기준\*, 장세명\*\*, 나인호\*\*\*, 김선우\*\*\*\*, 김흥태\*\*\*\*\*

(Ki-Jun Kang, Se-Myong Chang, In-Ho Ra, Sun-Woo Kim, Heung-Tae Kim)

### 요약

회전의 드론의 후류에서 발생하는 강한 유동과 살포되는 농약 노즐에서의 스프레이 유동이 동반될 경우, 극심한 기체의 요동과 함께 액적 유동은 바람의 영향을 크게 받게 된다. 특히 액적은 공기역학적인 항력의 영향을 받기 때문에 단순한 제자리 비행과는 달리 진진 비행을 할 경우 또는 측풍을 받고 있을 경우, 살포 영역에 큰 변화가 발생한다. 이로 인하여 드론을 활용한 농약살포에는 보다 큰 비산의 위험성이나 위치간의 낙하분산에 차이가 커져 효율성이 떨어질 수 있는 문제가 생긴다. 따라서 적절한 수치 모델링과 이를 적용한 전산 시뮬레이션을 통하여 다양한 비행 및 대기 조건을 적용할 수 있는 예측 도구가 필요하다. 본 연구에서는 로터에서 나오는 강한 하풍과 드론의 비행속도에 따른 액적 유동 특성에 대해 실험 및 수치해석을 진행하였으며, 액적이 분포하는 확률밀도함수를 구하여 서로 비교함으로써 농약살포용 드론에서 액적을 살포할 시 효율성을 증진시킬 수 있는 분사 시스템을 구축하고자 한다.

■ 중심어 : 드론 ; 스프레이 ; 액적 ; 확률 분포 ; 바람

### Abstract

When there is a spray flow such as from a pesticide nozzle, winds affect the droplet flow of a rotary-wing drone accompanied by a strong wake, with a severe oscillation. Especially, during forwarding flights or when winds come from the side, compare to a simple hovering flight as the droplet is in the effect of aerodynamic drag force, the effect of spraying region becomes even larger. For this reason, the spraying of pesticides using drones may cause a greater risk of scattering or a difference in droplet dispersion between locations, resulting in a decrease in efficiency. Therefore, through proper numerical modeling and its applied simulation, an indication tool is required applicable for the various flight and atmospheric conditions. In this research, we completed both experiment and numerical analysis for the strong downwash from the rotor and flight velocity of the drone by comparing the probability density function of droplet distribution to build a spraying system that can improve the efficiency when spraying droplets in the pesticide spray drone.

■ keywords : Drone ; Spray ; Droplet ; Probability Distribution ; Wind

## I. 서론

무인항공기를 대표하는 드론은 건설, 의학, 기상, 지리, 환경, 예술, 농업 분야 등 다양한 분야에서 드론 도입이 확대됨에 따라, 드론의 글로벌 시장 규모 또한 연 평균 10% 이상의 높은

성장세를 전망하고 있다[1,2]. 특히 농업 분야에서는 최근 농가 고령화로 인한 인력부족으로 농약살포용 드론의 사용이 급격하게 늘고 있는 실정이다[3]. 농업 분야에서의 드론 연구 개발은 대부분 농약 살포나 작파 등을 위한 발사체 탑재 장비에 관하여 진행되고 있으며[4], 드론을 활용하여 농약을 살포할 경우

\* 준회원, 군산대학교 건설기계공학과 석사과정

\*\* 정회원, 군산대학교 기계융합시스템공학부 교수

\*\*\* 정회원, 군산대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수

\*\*\*\* 정회원, (유)동아하이테크, 연구소장

\*\*\*\*\* 정회원, 충북대학교 농업생명환경대학 교수

이 논문은 2019년도 농촌진흥청 연구사업(세부과제:PJ013426042019)지원과 한국에너지기술연구원(KETEP)의 '네트워크 기반 유체기기 고효율화 고급트랙' 인력양성사업(No20174010201350)의 지원, 산업통상자원부 '건설기계 R&D 전문인력 양성사업(N0001292)'의 지원을 받아 수행된 연구임

접수일자 : 2019년 11월 21일

게재확정일 : 2019년 12월 23일

수정일자 : 2019년 12월 16일

교신저자 : 장세명, 나인호, e-mail : ihra@kunsan.ac.kr

에는 작물 환경에 영향을 주지 않도록 공중에서 접근하여 짧은 시간동안 넓은 범위에 농약을 살포함으로써 시간과 노동력을 절감할 수 있는 장점이 있다. 그러나 농약살포용 드론에 대한 규제 혹은 지침은 아직 완전하지 못한 상황이다. 농약살포에 있어서 가장 큰 문제는 비산(scattering)의 위험성이다. 액적(droplet)은 아주 작고 가볍기 때문에 바람에 큰 영향을 받는다. 비산을 예방하기 위해서는 드론의 로터에서 나오는 강한 하풍(downwash)과 측풍(side wind) 등 바람에 대한 액적 유동의 특성 연구가 필요하다.

본 논문에서는 드론의 로터에서 나오는 강한 하풍과 비행속도에 따른 액적의 낙하 분포 특성에 대한 실험을 진행 후 상용 코드인 ANSYS-CFX 수치해석 결과와 비교하였다.

## II. 드론의 항공역학

로터(rotor)에서 나오는 하풍의 속도는 구동원반이론(actuator disk theory)으로부터 계산할 수 있다[5]. 제자리 비행하는 회전차의 구동 원반의 모델이 그림 1에 나타나 있다.

후류에서의 흐름은 대기압이  $p_\infty$ 이고 정지해 있는 로터 윗면의 공기에서 나오며, 먼 하류에서는 압력이 다시  $p_\infty$ 로 회복된다고 가정한다. 추력은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$T = A(p_l - p_u) \tag{1}$$

여기서  $p_l$ 은 원반 아래쪽의 대기압,  $p_u$ 는 원반 위쪽의 대기압,  $A$ 는 원반 면적이다. 로터 윗면과 아랫면에 대해 베르누이 방정식을 적용하면 식 (2)와 식 (3)으로 표현된다.

$$p_\infty = p_u + \frac{1}{2}\rho v_i^2 \tag{2}$$

$$p_\infty + \frac{1}{2}\rho v_2^2 = p_l + \frac{1}{2}\rho v_i^2 \tag{3}$$

$v_i$ 와  $v_2$ 는 각각 로터에서 유도되는 유도속도(induced velocity)와 먼 하류에서 후류의 속도(wake velocity)이며, 식 (1-3)으로부터 조합하면 식 (4)와 같이 표현된다.

$$T = \frac{1}{2}\rho v_2^2 A \tag{4}$$

또한, 회전차의 추력은 단위 시간당 공기의 축방향 운동량 변화율과 같기 때문에 단위 시간당 회전차 원반을 통과하는 질량 유량( $M_{FLOW}$ )은 식 (5)와 같고 추력은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$M_{FLOW} = \rho A v_i \tag{5}$$

$$T = M_{FLOW} v_2 = \rho A v_i v_2 \tag{6}$$

식 (4)와 식 (6)으로부터 식(7)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$v_2 = 2v_i \tag{7}$$

식 (7)을 식 (4)에 대입하여 정리하면, 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$v_i = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}} \tag{8}$$

이렇게 얻어진  $v_i$ 는 이상 유도 속도(ideal induced velocity)라고 불리며, 회전차 추력 즉, 무게를 유지하기 위해 필요한 값이다.

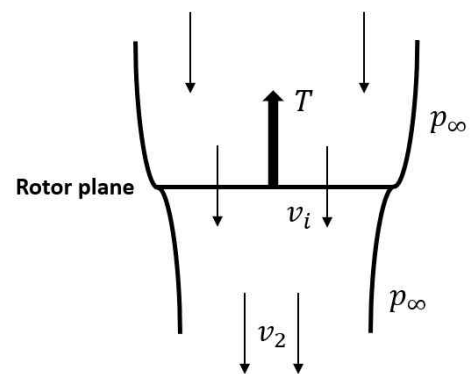


그림 1. 로터의 구동 원반 모델

## III. 실험 방법 및 결과



그림 2. 헥사콥터

드론의 비행속도에 따른 액적 분포도 영향에 대한 실험으로 농약살포용 드론의 노즐에서 분사되는 액적이 드론의 전진비행 속도에 따라 분포되는 특성에 대해 데이터를 수집 및 분석하였다. 이 실험은 2019년 10월 14일 군산대학교 대운동장에서 진행하였으며, 바람이 가장 약한 오전 7-9시 사이에 진행하였다. 실험장비는 헥사콥터와 액적분포지수를 측정할 수 있는 감수지를 사용하였다. 그림 2는 실험에 사용된 헥사콥터(hexacopter)이며, 농약살포용 드론으로 제작되었다. 실험에 사용된 드론의 제원은 표. 1에 나타나 있다.

표 1. 드론 사양

모델명	Hexacopter-DA-BAT10L
규격(L×W×H)	1,780 × 1,780 × 650
농약 저장 용량	10 L
드론 중량	11.3 kg(건전지 미포함)
최대 이륙중량	24 kg
노즐	Teejet DG11002
노즐간 간격	1,320 mm
모터 펌프	BPP-25(22-25 V, 25 W, 3.5L/min)
FC(Flight controller)	DJI A3-AG

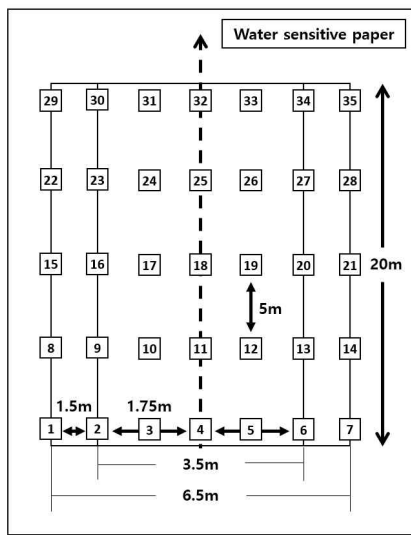


그림 3. 감수지 설치 위치



(a) 실험 전 감수지 (b) 실험 후 감수지

그림 4. 실험 전/후 감수지

그림 3은 액적분포지수를 측정하는 감수지 설치 위치이다. 가로 7개, 세로 5개 총 35개의 감수지를 살포 예상범위에 지정한 거리에 설치하였고, 그 위를 드론이 지나가면서 액적을 살포하였다. 드론의 고도는 농촌진흥청에서 제한한 2~3 m의 고도별(2 m, 2.5 m, 3 m) 반복 실험을 진행하였다[6]. 고도 3m일 때, 액적이 가장 분산이 잘 되며, 넓은 낙하면적을 얻을 수 있었기에 고도는 3 m로 고정하였고[7], 드론의 비행속도를 2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s로 변경하며 살포하였다.

그림 4는 드론에서 액적의 살포 전과 살포 후 감수지를 보여준다. 살포 후 감수지에 묻은 액적은 농약낙하분산조사지표에 따라 액적크기와 분포된 양으로 분포지수를 측정한다[8]. 그림 5와 표 2는 측정에 사용한 농약 낙하분산조사지표이다.

드론의 비행속도 2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s에 대해서 감수지에 묻은 액적을 농약낙하분산조사지표를 통해 측정하였다. 그러나 이러한 결과는 표준 단위로 표현된 것이 아니어서 수치해석 결과와 직접적인 비교가 어렵다. 따라서 정량적인 액적 유동의 분포 특성을 확인하기 위해 측정 결과를 그림 6과 같이 확률밀도(probability density) 그래프로 나타내었다.

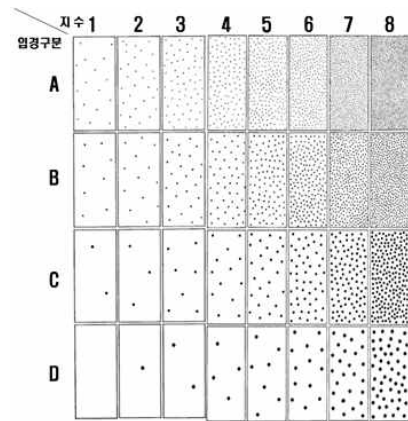


그림 5. 농약낙하지수 조사방법

표 2. 낙하분산조사지표

단계	구분 입경 [mm]	지수(낙하입수/cm <sup>2</sup> )							
		1	2	3	4	5	6	7	8
A	0.2	2	4	8	16	32	64	128	256
B	0.3~0.5	0.8	1.6	3.2	6.4	12.8	25.6	51.2	102.4
C	0.6~1.0	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.4	12.8	25.6
D	1.1~1.5	-	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.4

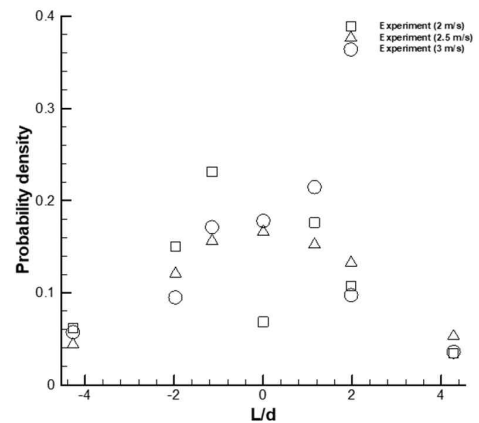


그림 6. 드론 속도에 대한 확률밀도그래프

### IV. 수치 해석 및 결과

지배방정식(governing equation)은 식 (9)와 식 (10)의 3차원 비압축성 Navier-stokes 방정식을 사용하였다.

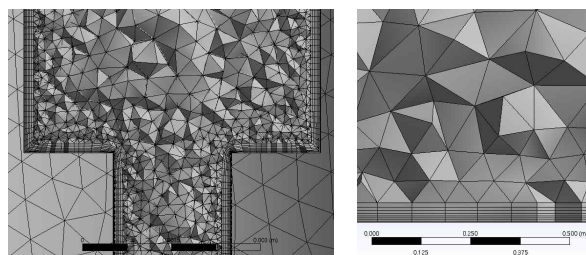
$$\nabla \cdot V = 0 \tag{9}$$

$$\rho \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) V \right] = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 V \tag{10}$$

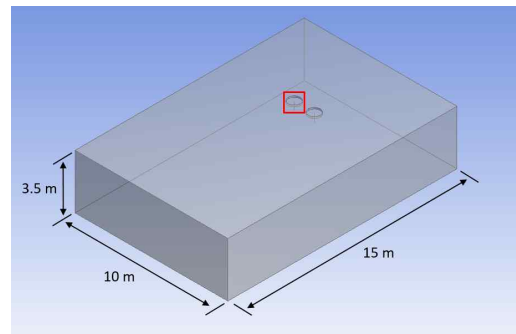
여기서  $V$ 는 속도 벡터,  $p$ 는 압력,  $\rho$ 는 밀도,  $\mu$ 는 점성계수,  $g$ 는 중력 가속도이다. 수치해석 프로그램은 상용코드인 ANSYS-CFX ver.19를 사용하였고, 난류 모델(turbulence model)은 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다.

#### (1) 해석 형상

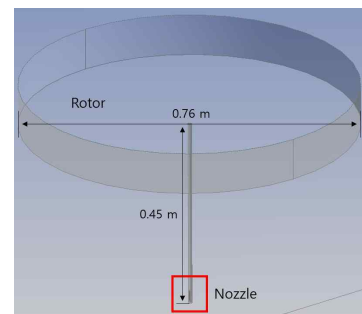
그림 7은 해석모델의 유동공간이다. 가로 15 m, 세로 10 m, 높이 3.5 m의 직육면체 형상이며, 로터의 회전면의 직경은 0.76 m이다. 실험에서 사용한 노즐을 3차원 모델링하여 해석에 적용하였고, 바닥에서부터 노즐까지의 높이는 3 m이다. 또한 로터와 노즐사이의 거리는 0.45 m이다. 해석 격자는 자유 사면체 (free tetrahedral)의 격자를 사용하여 구성하였다. 격자의 개수는 3,654,853개이며 액적이 분무되는 노즐 내부 유동공간이 매우 좁기 때문에 적절한 유동현상을 위해 노즐부에 조밀하게 격자를 생성하였다. 또한 노즐 내부 벽면과 해석모델 바닥에서의 유동이 벽면의 영향 즉, 유체의 점성에 의한 벽면 점착조건으로 발생하는 경계층(boundary layer)을 적절하게 해상하기 위하여 노즐부와 바닥부분에 8개의 층(layer)을 구성하였다. 그림 8은 노즐 내부의 격자형상과 해석모델 단면 바닥부분의 격자형상을 나타낸다. (a), (b)의 벽면에서 점착 조건에 의한 속도 변화가 큰 구간에 대해 얇은 8개의 정렬 격자 층을 확인할 수 있다.



(a) 노즐내부 격자형상 (b) 바닥 격자형상  
그림 8. 격자형상



(a) 전체 유동공간



(b) 노즐, 로터 유동공간

그림 7. 해석모델

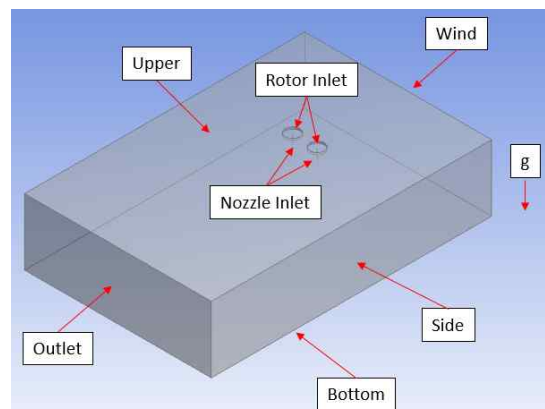


그림 9. 경계조건 개략도

표 3. 경계조건 정보

	Value	Unit
Nozzle Inlet	Bulk mass flow rate : 0.00933	kg/s
Rotor Inlet	Normal speed : 11.626	m/s
Outlet boundary	Average static pressure : 0	Pa
Upper boundary	Opening condition : 0	Pa
Side boundary		
Bottom boundary	No slip condition	-

## (2) 경계조건

해석모델 경계조건을 적용하기에 앞서 2가지 가정을 하였다.

가정 1: 드론의 전진비행속도는 상대속도로서 정면에서 맞바람이 분다고 가정하여 그림 9의 “Wind”면에 적용한다.

가정 2: 전진 비행 시 로터면 각이  $5^\circ$  이내로 매우 작아 유도속도( $v_i$ )에 영향을 미치지 않는다고 가정한다.

위 가정들로 드론의 전진비행속도는 노즐 정면 벽에 바람속도를 적용하였으며, 로터에서 수직하방으로 나오는 바람속도는 구동원반이론의 식 (8)을 적용하였다. 노즐에서의 물 유입은 실험에서 적용된 유량조건을 주었고, 옆면과 윗면은 열린 경계조건(boundary condition)의 대기압을 주었으며 뒷면은 출구 조건의 대기압을 적용했다. 아랫면은 미끄러짐이 없는 벽 조건을 적용하였다. 자세한 경계조건은 표 3에 나타내었고, 해석은 정상상태(steady state)에 대해서 진행하였다. 전체 계산영역(computational domain)은 그림 9와 같이 높이 3.5 m의 직육면체 형상이며 로터의 회전면의 직경은 0.76 m이다.

## (3) 해석결과

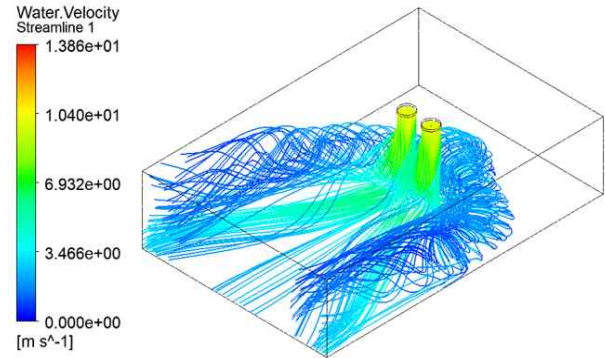
그림 10은 노즐 정면에서 바람속도 2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s일 때 속도유선을 나타낸다. 정면에서 부는 바람과 로터에서 수직 아래로 부는 바람의 영향이 합성되어 제트(jet)에 와류(vortex)가 형성되는 것을 볼 수 있다. 각 그림에서 3차원적인 와류 구조가 확연히 보이며, 전진속도(advance velocity)의 차이에 따라 와류의 묶음 가닥들(vortex filaments)이 더 크게 형성이 되고, 3 m/s일 때는 완전히 비행 궤적과 평행하게 뻗어나가는 현상을 보여준다. 이상의 형상으로부터, 풍속이 강할수록 유도속도보다 전진속도의 영향을 상대적으로 더 많이 받는다는 사실을 알 수 있다.

그림 11은 바닥면의 물 부피분율(water volume fraction)에 대한 등고선이다. 일반적으로 풍속 2.5 m/s 이내에서는 지면에 닿은 제트 경계가 포물면(parabola surface)과 유사한 경계층을 형성하고 긴 꼬리 부분의 후류를 형성하는데 비하여 풍속이 3m/s가 되면, 노즐 유동이 직접 두갈래 꼬리를 형성한다.

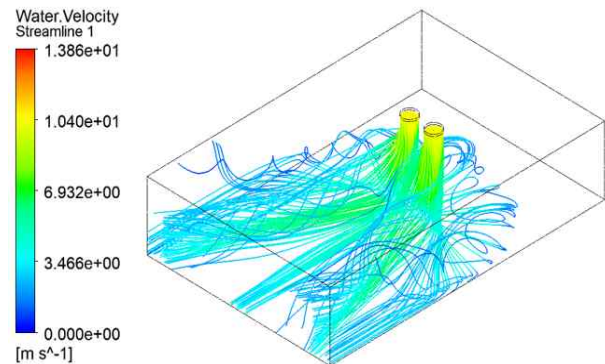
액적 유동의 분포 특성을 확인하기 위해 바닥면 부피분율을 그림 12와 같이 확률밀도 그래프로 나타내었다. 이 그래프들은 실험 결과와 직접 정량적 비교가 가능하다.

그림 13은 실험과 수치해석결과를 확률밀도 그래프로 비교한 결과이다. 여기에서 가로축은 노즐의 액적 유동이 지면에 닿는 부분에서 후류를 가로지르는 선분을 따라 노즐 중심 위치로부터의 거리(L)를 로터 직경(d)으로 나누어 무차원화한 값이다. 부피분율로부터 구한 확률 밀도의 의미는 노즐에서 튀어나간 액적 하나가 특정 위치에 떨어질 확률의 분포를 의미하는 것으로 확률 밀도로 나타내면 모든 면적의 확률을 더했을 때 1이 나오는 조건으로 표준화(normalization)한 것이다.

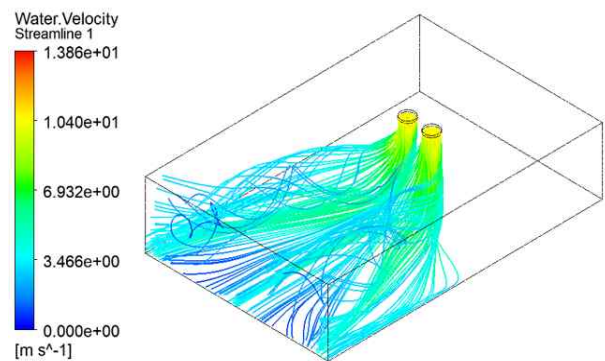
실험과 수치해석결과 모두에서 속도가 빨라짐에 따라서 분포 폭이 좁아지는 경향을 확인할 수 있었다. 2 m/s에서는 액적이 분포되는 폭이 가장 넓으나 위치간의 낙하분산에 차이가 큰 것을 확인할 수 있었다. 3 m/s에서는 액적분포가 골고루 뿌려져 가장 양호한 것으로 보이며 액적분포특성은 액적이 바람방향으로 뻗어나가려는 현상을 확인할 수 있다.



(a) 바람속도 2 m/s

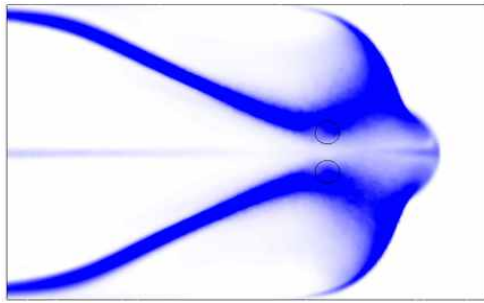


(b) 바람속도 2.5 m/s

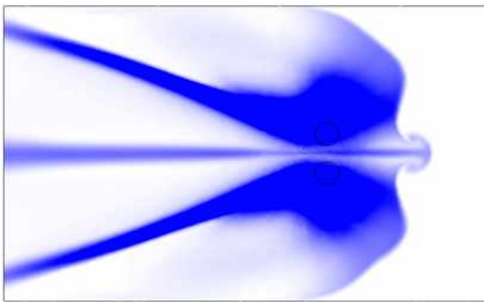


(c) 바람속도 3 m/s

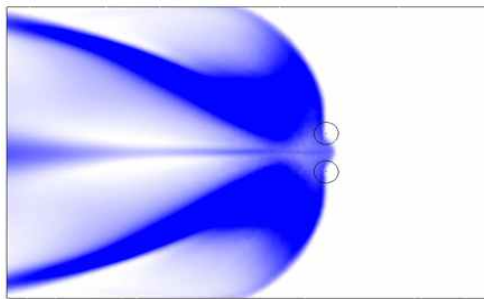
그림 10. 속도유선



(a) 바람속도 2m/s

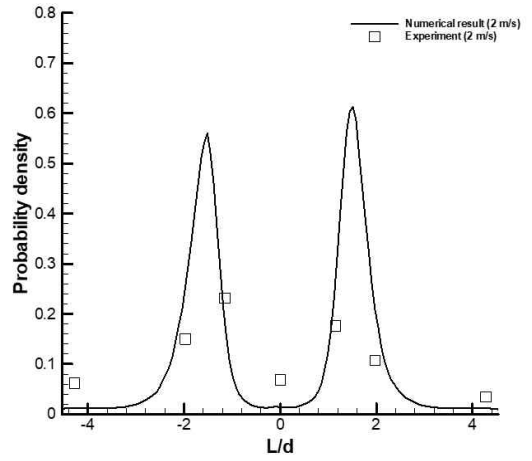


(b) 바람속도 2.5m/s

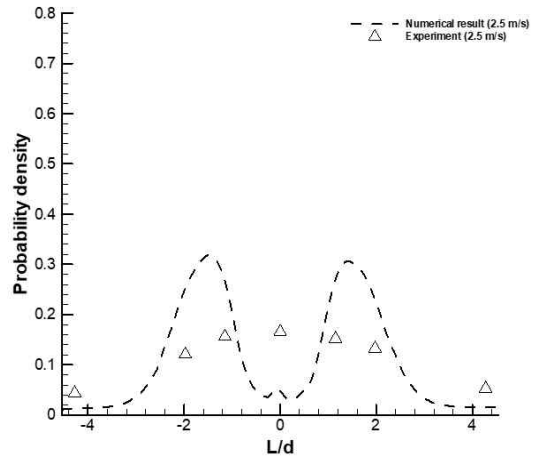


(c) 바람속도 3m/s

그림 11. 바닥면의 부피분율 등고선



(a) 바람속도 2 m/s



(b) 바람속도 2.5 m/s

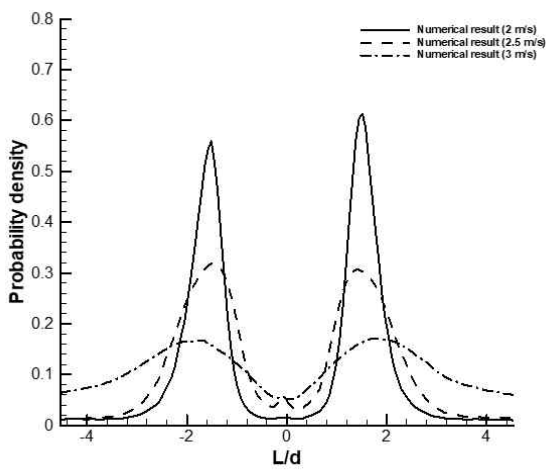
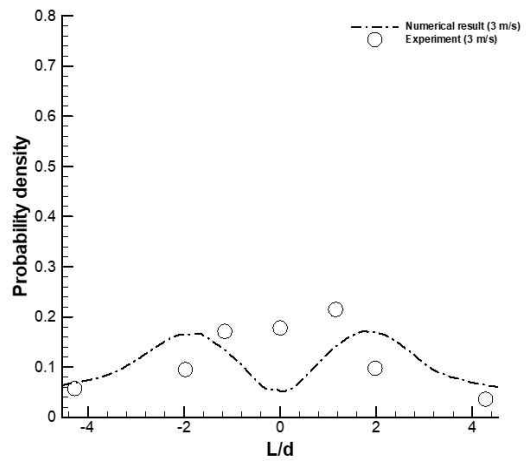


그림 12. 바람속도에 대한 확률밀도 그래프



(c) 바람속도 3 m/s

그림 13. 결과비교

## V. 결론 및 향후연구

본 논문에서는 고도 3 m일 때 드론의 로터에서 나오는 강한 하풍과 비행속도(2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s)에 따른 액적의 낙하 분포 특성에 대한 실험을 진행 후 상용코드인 ANSYS CFX 수치해석 결과와 비교하였다. 해석결과 비교에서 실험 결과와 수치해석결과에 드론 동체의 영향, 난류 강도의 차이, 외부 측풍 등의 원인으로 오차가 생기는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통하여 주어진 비행 조건에서 노즐의 형상이 바뀔 때 도포되는 농약의 분포에 대한 보다 정밀한 시뮬레이션이 가능할 것으로 보인다. 이 데이터를 바탕으로 작물의 종류와 생장 과정에서 적절한 농약 살포 방법에 대한 가이드라인을 설정하는 선행 연구로 사용할 수 있다.

드론은 전진비행을 할 때 드론 몸체가 앞으로 기운다. 속도가 빠를수록 더 큰 기울기를 가지게 되므로 로터의 회전면으로부터 나오는 하풍의 방향도 영향을 미칠 것이라 판단되며, 향후 연구에서는 실험과 수치해석의 오차를 줄이는 부분에 대해 연구를 진행할 예정이다.

## REFERENCES

- [1] S.W. Kim, "Prototype design for unmanned aerial vehicle-based BigData Processing," Smart Media Journal, vol. 5, no. 2, pp. 51-58, 2016.
- [2] N.H. Kim, "Development of atmospheric environment information collection system using drone," Smart Media Journal, vol. 7, no. 4, pp. 41-51, 2018.
- [3] I.H. Ra, S.W. Kim, and Y.S. Choi, "Research on improvement of pesticide spray efficiency using multicopter," Korean Institute of Smart Media, vol. 7, no. 2, pp. 68, 2018.
- [4] W.S. Im, S.R. Angsantto, and Y.H. Yang, "Manless Flight Device Including Launcher for Agriculture," Korean Patent, 10-1694636, 2017.
- [5] S. Lee, G. Choi, and S.M. Chang, "Helicopter Engineering," Inter-Vision, 2002, Translated from the English version: S. Newman, Fundamentals of Helicopter Flight, Edward Arnold, London, 1994.
- [6] 농촌진흥청, 무인항공방제용 농약등록시험 기준 개선 [http://www.rda.go.kr/board/board.do?boardId=farmprmninfo&prgId=day\\_farmprmninfoEntry&currPage=1&dataNo=100000758391&mode=updateCnt&searchSDate=&searchEDate=&totalSearchYn=YY](http://www.rda.go.kr/board/board.do?boardId=farmprmninfo&prgId=day_farmprmninfoEntry&currPage=1&dataNo=100000758391&mode=updateCnt&searchSDate=&searchEDate=&totalSearchYn=YY) (accessed Dec., 24, 2019).

- [7] 최지영 외 7명, "드론의 비행속도와 고도 및 노즐의 종류가 물입자의 낙하에 미치는 영향," 한국농약과학회 추계학술발표회, 76쪽, 2019년
- [8] 농촌진흥청, 농촌진흥청고시 제2019-36호 [http://www.rda.go.kr/board/board.do?mode=list&prgId=law\\_rdalwEntry&boardId=rdalw&currPage=1&dataNo=10000549310&CONTENT8=Y](http://www.rda.go.kr/board/board.do?mode=list&prgId=law_rdalwEntry&boardId=rdalw&currPage=1&dataNo=10000549310&CONTENT8=Y) (accessed Dec., 24, 2019).

## 저자 소개



강기준(준회원)

2018년 군산대학교 기계융합시스템공학부 학사 졸업  
2019년 군산대학교 건설기계공학과 석사 수료

<주관심분야 : 항공역학, 드론, 최적설계>



장세명(정회원)

1994년 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과 학사 졸업  
1996년 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과 석사 졸업  
2000년 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과 박사 졸업

<주관심분야 : 항공역학, 드론, 영상처리, 데이터송수신>



나인호(정회원)

1988년 울산대학교 전자계산학과 학사 졸업  
1991년 중앙대학교 전자계산학과 석사 졸업  
1995년 중앙대학교 전자계산학과 박사 졸업

<주관심분야 : 드론, IoT, 무선센서네트워크, 스마트그리드, 마이크로그리드, 5G>



김선우(정회원)

2000년 군산대학교 정보통신공학과  
학사 졸업  
2002년 군산대학교 정보통신전공학과 석사 졸업  
2008년 군산대학교 정보통신전공학과 박사 졸업  
2018년 (유)동아하이테크 연구소장

<주관심분야 : 영상처리, 무인비행체 자율주행, 인공지능, 컴퓨터 비전>



김흥태(정회원)

1984년 서울대학교 농생물학과 학사  
졸업  
1986년 서울대학교 농생물학과 석사  
졸업  
1996년 일본 사이타마대학 환경생물  
연구부 박사 졸업

<주관심분야 : 드론 농약살포, 살균제, 식물진균병학>