

군집을 모사한 입자-격자 구조의 난류 내 동적 안정성

오정석* · 윤성근* · 박한준 · 황원태†

Dynamic Stability of Particle-Lattice Structures Simulating Swarms in Turbulence

Jeong Suk Oh*, Sung Gun Yoon*, Han June Park* and Wontae Hwang†

Abstract The dynamic stability of swarms is crucial in preventing collisions in clustered flights and safely moving along a defined path. Although there have been many simulation studies on dynamic stability, there have not been many experimental studies using real clusters due to the difficulty in implementation. In this study, we constructed a particle-lattice structure simulating bird flocks or drone swarms, and conducted experiments within turbulent flow. We identified a criterion that describes dynamically stable particle-lattice structures. The stability increased as this newly defined spatial index increased.

Key Words : Swarm (군집), Dynamic Stability (동적 안정성), Particle-Lattice Structure (입자-격자 구조)

기호설명

$u_{1,rms}$: x 방향 유동 속도의 RMS 값
 $u_{2,rms}$: y 방향 유동 속도의 RMS 값
 U_1 : x 방향 유동 속도의 평균 값
 U_2 : y 방향 유동 속도의 평균 값
 σ_a : 가속도의 표준편차

σ_v : 속도의 표준편차
 a_{max} : 가속도의 최댓값
 v_{max} : 속도의 최댓값
 x_i : 시간 i에서의 위치
 v_i : 시간 i에서의 속도
 a_i : 시간 i에서의 가속도
 N : 구조 내의 입자 개수
 NV : 특정 입자에 대한 인접 입자 수
 $\sum NV$: 전체 구조에서의 인접 입자 수 총합
 α : 각 입자의 평균 인접 입자 수(입체지수)

† Corresponding author:

Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University
Institute of Advanced Machines and Design, Seoul National University
E-mail: wthwang@snu.ac.kr

* Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University

1. 서론

최근 들어 자연에서의 군집 비행과 인공 비행체의 군집 비행 등에 대한 연구가 모두 활발히 진행되

고 있다. 자연에서의 군집 비행의 경우 2001년 Nature에 실린 논문⁽¹⁾을 기점으로 새나 물고기 군집의 움직임에 대한 연구가 다양하게 진행 중이다. 비행체의 군집 비행의 경우, 특히 드론 분야에서 연구가 활발하다. 드론 군집 비행의 경우 실제 구현된 사례도 드물지 않다. 지난 2018년 평창 올림픽에서 1218대의 드론이 함께 비행하며 오류기를 그려내는 장관이 연출되기도 하였고, 아마존은 모션에서 드론을 살포하는 방식의 사업을 구상하고 있다.

그러나 위 두 가지 사례는 미흡한 점들이 분명히 있다. 평창 올림픽의 경우 당일 기상 좋지 않아 드론 군집 비행은 사전 촬영된 영상으로 대체되었고 아마존의 컨셉 또한 배터리의 용량 한계에 따른 지속능력 문제, 기체 간 충돌로 발생하는 파손 등의 문제로 진척이 굉장히 더디다.

기술적인 문제들을 해결하기 위한 연구 방식은 크게 수치해석적 방식과 실험적 방식으로 나뉘는데, 이 중 실험 연구는 거대한 풍동과 실제 기체를 요구하므로 실험에 드는 비용이 크다.

본 연구는 실험실 환경에서 군집과 유동의 상호작용을 모사할 수 있는 모형을 새롭게 제시한다. 입자-격자 구조는 실과 스티로폼 공을 이용하여 군집을 효과적으로 모사할 수 있는 모형이다. 입자수와 개체 간의 상대적 배치를 변화시키며 다양한 입자-격자 구조를 제작하였다. 이후, 입자-격자 구조가 1-D 유동 내에서 자유롭게 떠다닐 수 있도록 하여 유동과 구조의 상호작용을 확인하였다. 이를 통해 난류에 의해 군집 내 개체가 느끼는 부담이^(2,3) 입자-격자 구조에 따라 상이함을 직접 실험을 통해 검증하였다. 실제 군집 연구에 입자-격자 구조를 이용한 연구를 적용한다면 경제적 비용과 실험 장치의 제한점을 극복할 수 있을 것이라 예상된다. 동시에 실제 실험에 비해 모사 실험을 통해 군집의 전반적인 특성 연구를 가속화할 수 있을 것이라 기대한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 구동부

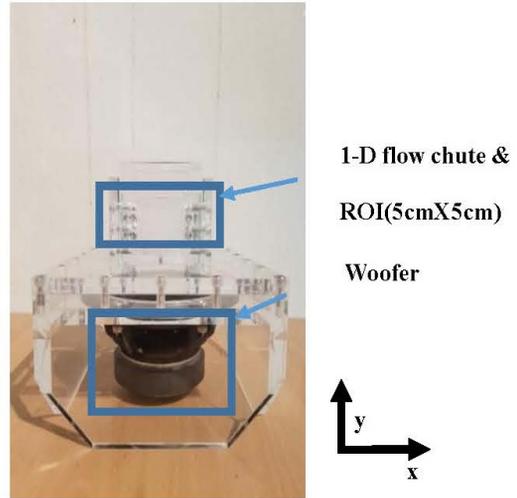


Fig. 1. Turbulence generator chute

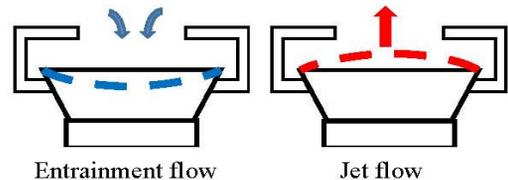


Fig. 2. Synthetic jet

Fig. 1에 나타나 있는 구동부의 경우 통제된 난류 발생 장치인 1-D 유동 관과 우퍼로 구성되어 있다. 합성 제트생성기로 난류를 형성하는 연구⁽⁴⁾에 따르면 우퍼를 이용하여 합성 제트를 만들 수 있다. Variano⁽⁵⁾는 64개의 무작위로 생성된 제트 다발을 이용하여 1-D 관 내에서 난류를 발생시켰다. 본 연구에서 사용한 난류 발생기는 개방형으로 구성되어 있으며 상단부가 외부로 개방되어 있다. 난류 발생기에 설치된 우퍼를 40-60Hz 범위 내에서 무작위 하게 가진 시켰다. 가진 된 우퍼는 Fig. 2에 도시된 것과 같이, 내부 공기를 제트 형태로 외부로 배출하여서 1-D 유동 관 내에 유동을 형성한다. 우퍼의 경우 Peerless 사의 PPB 836860을 사용하였다. 가해지는 전압을 조절하여 유동의 세기를 바꿀 수 있다. 관측 영역 내에서 유동이 형성되도록 모델을 설계하였다.

2.1.2 측정부

측정부의 경우 Fig. 3의 오른쪽 하단에 있는 측정 장비를 교체함에 따라 목적성을 달리할 수 있다. 모형의 거동을 관측하는 실험에서는 초고속 촬영이 가능한 Phantom 사의 V2512를 사용하였다. 내부 유동 특성을 파악하는 실험에서는 PIV(Particle Image Velocimetry)용 CCD 카메라를 이용하였다. 본 연구에서 이용한 실험용 관이 개방형이기 때문에 내부 유동을 측정하는 PIV 실험의 경우 입자를 가두기 위해 보다 큰 밀폐된 아크릴 상자 안에 실험용 관을 집어넣어 실험을 진행하였다. 촬영된 영상의 해상도는 1920px × 1200px이며, 초고속 촬영 및 PIV 실험 설정은 Table 1, 2에 기재하였다.

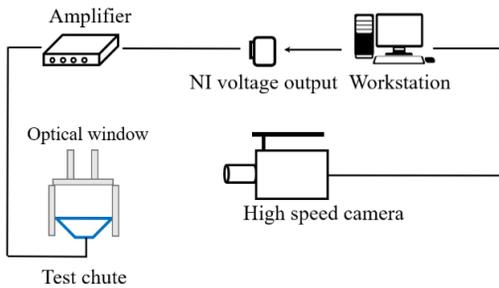


Fig. 3. Experimental setup

Table. 1. Phantom V2512 high-speed camera setting

FPS	4000 frames per second
ROI size	5cm x 5cm
Focal length	50cm

Table. 2. PIV test setting

FPS	20 frames per second
ROI size	3.5cm x 3.0cm
Interrogation Window	64px(50% overlap)

2.1.3 모형

Reynolds의 연구⁽⁶⁾에 따르면 균집은 alignment, cohesion, separation이라는 세 가지 특성을 만족해야 한다. 세 가지 특성을 요약하면 균집은 형태가 유지되어야 하며 개체와 개체 사이의 간격이 일정 수준 이상 멀어지지도 가까워지지도 않아야 한다. 이에 더해 균집의 개체들은 서로 간에 신호를 주고받으며 위와 같은 특성⁽⁷⁾을 만족하려는 모습을 보이는 것이 밝혀져 있다.

본 연구에서 사용한 입자격자 구조는 아주 값싸고 간단하게 제작이 가능하며 위의 세 가지 특성을 쉽게 만족시킬 수 있는 모형이다. 스티로폼 공과 탄성이 있는 실을 사용하여 격자를 만듦으로써 형태가 유지되고 개체들 사이의 거리가 일정 이상 가까워 지지도 멀어 지지도 않는다. 특히나 탄성이 있는 실을 통해 앞서 언급한 개체 간의 신호 전달 모형을 모형에서 구현할 수 있다. 실제 모형의 예시 사진이 Fig. 4에 나타나 있다.

모형의 제작에는 지름 1mm 크기의 스티로폼 공과 탄성이 있는 실을 사용하였고 크기와 질량의 편차가 10% 이내가 되도록 하였다. 본 연구에서는 동일한 입자 수의 구조마다 난류 내에서 보이는 안정성이 상이할 것이라는 추론에 따라 동일한 입자 수 내에서 다양한 모양의 구조가 제작 가능하도록 dimension을 Table 3과 같이 설정하였다. 또한 각 격자 구조의 특성을 대표하는 값으로 균집에서 사용되는 NN(nearest neighbor, 입자 당 근접 입자 수)이라는 개념⁽⁸⁾을 정의하였으며 이를 Table 3에 기재하였다.

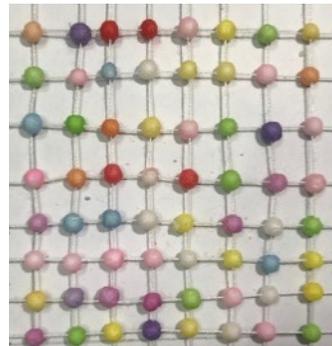


Fig. 4. Particle-Lattice structure for 8 × 8 case

Table 3. Structure parameters

Dimension	Particle Number(N)	Sum of NN ($\sum NN$)	$\alpha = \frac{\sum NN}{N}$
6 x 6	36	60	1.67
2 x 3 x 6	36	72	2.00
4 x 3 x 3	36	75	2.08
6 x 8	48	82	1.71
2 x 3 x 8	48	98	2.04
2 x 4 x 6	48	100	2.08
8 x 8	64	112	1.75
2 x 4 x 8	64	136	2.13
4 x 4 x 4	64	144	2.25

MN의 총합을 입자의 총 개수로 나누면 9가지 모형을 표준화하여 관찰할 수 있다. 본 연구에서는 해당 값을 입체 지수($\alpha = \frac{\sum NN}{N}$)로 정의하였다. 입체 지수가 증가함에 따라 구조는 평면에서 입체로 변화하게 된다.

2.2 실험 방법

상단부가 개방되어 있는 관에 모형을 집어넣고 무작위 사인과 생성기를 이용해 우퍼를 가진 시켰다. 이는 1-D 관 내부에 난류를 발생시킨다. 이후 모형의 거동을 5cm*5cm 창을 통해 초고속 카메라로 촬영하였다.

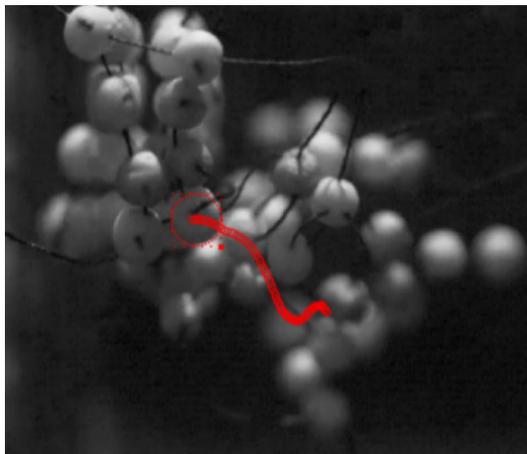


Fig. 5. Particle tracked using Tracker

초고속 카메라로 4000 fps의 속도로 촬영한 영상을 오픈 상용 프로그램인 Tracker⁽⁹⁾ 이용하여 각 프레임 별로 입자들의 위치를 측정하였다. 위치 값을 바탕으로 유한 차분법을 이용해 속도 데이터 및 가속도 데이터를 도출하였다. Tracker의 사용 모습은 Fig. 5에 나타나 있다.

각 군집 배치의 안정성을 평가하기 위하여 input 변수는 앞서 정의한 입체 지수 α 로 정하고 output 변수는 가속도의 표준편차 σ_a , 속도의 표준편차 σ_v , 최대 가속도 a_{max} , 그리고 최대 속도 v_{max} 으로 정하여 input과 output의 상관관계를 조사하였다. 이 과정에서 유동 위에 떠 있는 군집의 경우 x, y, z 방향의 모든 움직임을 가지지만, 본 연구에서는 x, z 방향이 대칭적으로 구성되어 있기 때문에 y와 x 방향의 값들만 측정하였으며, z 방향 값을 x 방향 값과 동일한 값을 사용하였다.

기존 연구 결과⁽¹⁰⁾에 따르면 난류 강도가 증가함에 따라 각 개체의 동적 안정성이 감소한다. 본 연구는 한방향으로 제한된 난류에 국한되어 있기 때문에, 속도와 가속도 데이터를 관측하여 각 개체의 동적 안정성을 측정할 수 있었다. 위에 제시된 output 변수를 통해 군집 내의 개체가 가지는 속도와 가속도의 값이 특정 시간 동안 변화하는 크기로 표현할 수 있고, 이는 각 개체의 동적 안정성에 대한 지표로 사용될 수 있다. 난류에 의해 발생하는 개체의 동적 안정성 감소는 생물체의 근육 및 드론과 같은 물체의 모터에 부하를 발생시킨다.

3. 실험 결과

유동장의 전체적인 특성을 파악하기 위한 PIV 실험 결과와 설계된 Particle-Lattice 구조의 거동 특성을 측정한 실험 결과를 각각 3.1절과 3.2절에 기록하였다.

3.1 PIV test

본 실험에서 제작한 난류 유동 장치는 1-D 유동을 만들어 내기 위해 제작하였다. 유동 특성을

분석하기 위해 PIV 실험을 실시하였다. 결과는 Table 4에 정리하였다. 기존 연구들의 결과에^(4,5) 비해 본 실험에서 수행한 결과는 평균속도와 RMS 값의 비율에서 큰 차이점을 보인다. Table 4에서 $u_{1,rms}$ 값에 비해 $u_{2,rms}$ 의 값이 3배 가량 크다. 따라서 설계한 1-D 유동 관 내에서 입자-격자 구조에 영향을 크게 미치는 유동이 y 방향임을 확인할 수 있다.

Table 4. PIV test results

	Hwang and Eaton	Variano and Cowen	1-D Chute
Medium	Air	Water	Air
$u_{1,rms}$ (m/s)	0.87	0.00391	1.47
$u_{2,rms}$ (m/s)	0.84	0.00498	5.27
U_1 (m/s)	0.019	0.00026	-0.0153
U_2 (m/s)	-0.088	0.00010	-0.985
$U_1/u_{1,rms}$	0.022	0.07	-0.0104
$U_2/u_{2,rms}$	-0.10	0.02	-0.187

3.2 모형 측정 결과

본 실험을 통해 얻어지는 데이터는 시간에 따른 각 입자의 위치다. 해당 입자의 시간 i 에서의 위치 데이터에 유한 전진 차분법을 적용하여 속도와 가속도 데이터를 얻을 수 있다.

$$v_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} \quad (1)$$

$$a_i = \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta t} \quad (2)$$

Fig. 6, 7는 각각 공간적인 2x4x6 case와 평면적인 6x8 case에서의 속도 데이터이다.

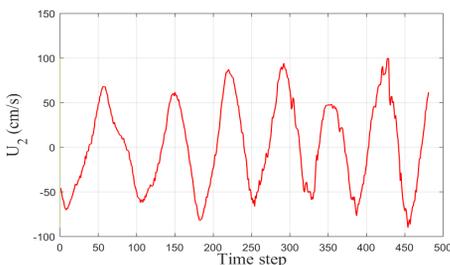


Fig. 6. Velocity trend for volumetric 2x4x6 case

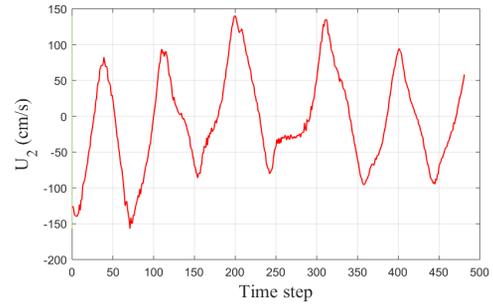


Fig. 7. Velocity trend for plane 6x8 case

본 연구에서는 관 내 공기를 40~60Hz범위 내에서 가진 하였다. 이에 따라 전체적으로 모델의 진동 주파수는 중심 주파수인 50Hz와 매우 유사하였다. 이를 바탕으로 주기의 배수로 분석 frame 수를 선정하였으며, 총 6주기에 해당하는 480 frame을 분석하였다.

3.3 모형의 경향성 확인

모형의 안정화 경향성을 확인하기 위해서 여러 물리량을 비교하였다. 구조의 입체적인 정도를 의미하는 입체 지수 a 를 input으로 하여 속도 최댓값 v_{max} , 속도 표준편차 σ_v , 가속도 최댓값 a_{max} , 그리고 가속도 표준편차 σ_a 의 변화를 조사하였다.

속도 표준편차와 최대 속도의 경우, 모델이 점점 입체로 변화하는 과정에서 감소하는 경향을 Fig. 8, 9에서 확인할 수 있다. 또한 가속도 표준편차와 최대 가속도의 경우에도 뚜렷하지 않지만, Fig. 10, 11에서 입체 지수가 증가함에 따라 감소하는 경향성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향성은 동일한 입자수를 가지고 있는 군집 내에서 MV 값이 증가함에 따라 동적 안정성이 증가한다는 것을 보여준다. 추후 비행하는 군집체를 설계하거나 연구하는 데 있어서 입체 지수가 동적 안정성을 증가시키는 한 요소로 작용할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구 결과는 군집으로 비행하는 구조의 이점에 대한 새로운 관점을 제시한다. 기존 연구들은 V-formation으로 나는 군집체의 형태가 군집 내 개개의 Lift를 증가시킨다는 사실을⁽¹⁾ 증명

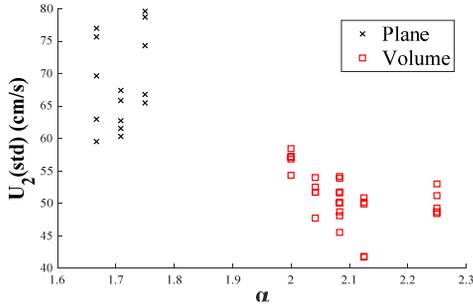


Fig. 8. Velocity standard deviation vs. spatial index

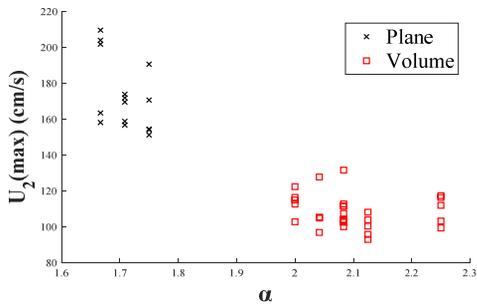


Fig. 9. Maximum velocity vs. spatial index

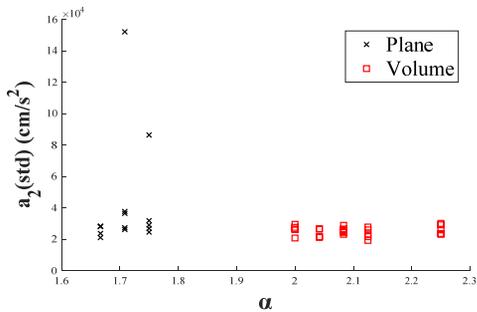


Fig. 10. Acceleration standard deviation vs. spatial index

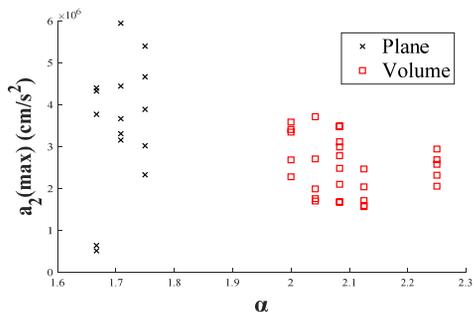


Fig. 11. Maximum acceleration vs. spatial index

하였다. 하지만, 많은 개체가 모여서 비행하는 J-formation 군집체는 drag 측면에서 오히려 손해를 발생시킨다는 연구 결과들이 있다⁽¹¹⁾. 본 연구에서는 J-formation과 같이 모여서 비행하는 군집체에 대해 입체 지수가 증가함에 따라 각 개체의 동적 안정성이 증가하는 것을 실험을 통해 확인하였다. 즉, 군집체의 비행 구조가 입체 형태로 가까워질 때 각 개체의 안정성이 전반적으로 증가한다는 것을 시사한다. 작은 개체들이 군집 형태로 비행할 때 drag 측면에서 손해가 발생할 수도 있지만, 난류 유동과 같은 외부 자극에 대해서는 개체의 운동을 보다 안정적으로 유지할 수 있게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 연구와 달리, 실험실 환경에서 군집 연구를 수행할 수 있도록 군집을 입자-격자 구조로 모사하였다. 이러한 구조는 군집이 가지고 있는 alignment, cohesion, separation 이라는 대표적인 3가지 특징을 반영하기 때문에, 기존 실험에서의 군집을 대체할 수 있는 효과적인 모형이다.

입자-격자 구조의 거동 특성을 알아보기 위해, 이 구조를 부양시킬 수 있는 합성 제트생성기와 1-D 관을 설계하였다. 합성 제트생성기의 세기와 주파수를 조절하여, 격자 구조가 관측 영역 내에서 안정적으로 부유할 수 있는 조건을 찾았다. 입자-격자 구조와 유동장과의 상호작용을 개별 입자 속도와 가속도의 표준편차 등을 이용해 분석하였다. 입체 지수를 새로이 정의하였고, 구조 내 개별 입자의 속도와 가속도의 최댓값, 표준편차가 입체 지수에 따라 감소하는 경향성을 확인하였다. 이것은 각 입자의 인접 입자 수가 많은 구조일수록 난류 내에서의 거동이 안정적인 임을 의미한다.

향후 격자 구조로 되어 있는 공들의 형상을 실제 군집 구성 요소들의 형상으로 바꾸는 등의 방법을 통해, 실제 현상을 더 비슷하게 모사할 수 있는 실험으로 발전할 수 있을 것이라 기대한다.

후 기

이 논문은 2019 년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1A2B4007372). 아울러 2018 년도 서울대학교 학부생 연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCE

- 1) Weimerskirch, H., Martin, J., Clerquin, Y., Alexandre, P., and Jiraskova, S., 2001, "Energy saving in flight formation," *Nature*, Vol. 413, pp. 697-698.
- 2) Bowlin, M.S. and Wikelski, M., 2008, "Pointed wings, low wingloading and calm air reduce migratory flight costs in songbirds," *PloS one*, Vol. 3, p. e2154.
- 3) Pennycuik, C., Alerstam, T., and Hedenström, A., 1997, "A new low-turbulence wind tunnel for bird flight experiments at Lund University, Sweden," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 200, pp. 1441-1449.
- 4) Hwang, W. and Eaton, J.K., 2004, "Creating homogeneous and isotropic turbulence without a mean flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 36, pp. 444-454.
- 5) Variano, E.A. and Cowen, E.A., 2008, "A random-jet-stirred turbulence tank," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 604, pp. 1-32.
- 6) Reynolds, C.W., 1987, *Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model*, ACM, pp. 25-34.
- 7) Toner, J. and Tu, Y., 1995, "Long-range order in a two-dimensional dynamical XY model: how birds fly together," *Physical review letters*, Vol. 75, p. 4326.
- 8) Young, G. F., Scardovi, L., Cavagna, A., Giardina, I., and Leonard, N. E., 2013, "Starling Flock Networks Manage Uncertainty in Consensus at Low Cost," *Plos Computational Biology*, Vol. 9, e1002894
- 9) Brown, D. and Christian, W., 2011, "Simulating what you see: combining computer modeling with video analysis," In *8th International Conference on Hands on Science*. Ljubljana, Slovenija.
- 10) Sapir, N., Horvitz, N., Wikelski, M., Avissar, R., Mahrer, Y., and Nathan, R., 2011, "Migration by soaring or flapping: numerical atmospheric simulations reveal that turbulence kinetic energy dictates bee-eater flight mode," *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 278, pp. 3380-3386.
- 11) Higdon, J. J. L., and Corrsin, S., 1978, "Induced drag of a bird flock," *The American Naturalist*, Vol. 112, pp. 727-744.