

# 제주도의 '카르만 볼텍스' 현상에 대한 수치해석적 이해와 3D 모델링 제작 및 CFD 실험을 통한 현상의 개선 및 활용방안 연구

이돈영, 김찬진, 이은찬, 홍대의  
대전동신과학고등학교 1-2, 대전 300-310

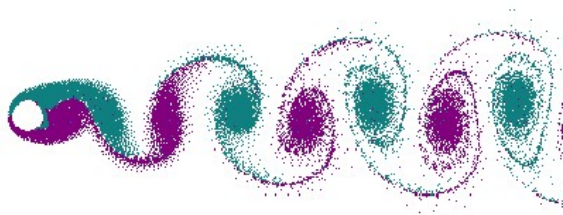
## ABSTRACT

우리나라 최남단의 화산섬 제주도에서는 전 세계를 통틀어 유일한 대규모 '카르만 볼텍스' 현상을 관찰할 수 있는 지역이다. 본 연구를 통하여 제주도에서 카르만 볼텍스 현상이 일어나는 원인과 카르만 볼텍스의 경계조건에 대해 탐구하고 이 현상을 완화, 개선하거나 이용할 수 있는 방안에 대해 탐구하였다.

## 1. 도입

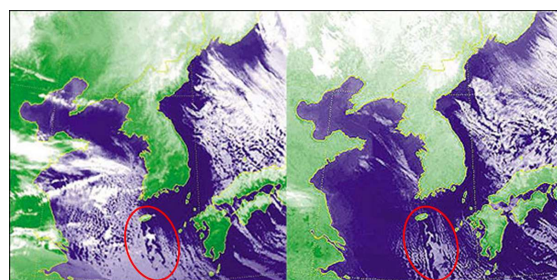
### 가. 연구 동기

우리나라 최남단에 위치한 한반도에서 가장 큰 화산섬인 제주도는 지질, 생태계 뿐 만이 아니라 기상학적으로도 여러 학자들의 이목을 집중시키는 장소이다. 특히, 기상학 학계에는 '카르만 볼텍스' 라는 현상으로 제주도가 상당히 유명한데, 인공위성에서도 관측될 정도로 대규모의 카르만 볼텍스가 일어나는 곳은 전 세계에서 제주도가 거의 유일하기 때문이다.



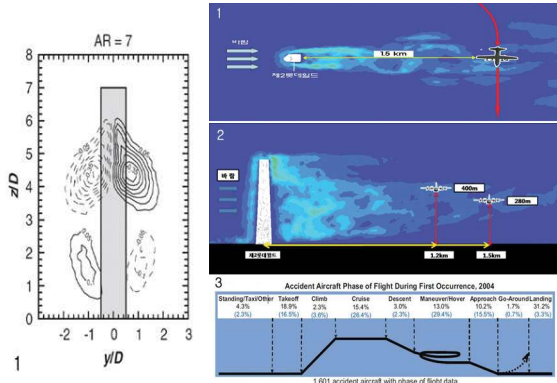
[그림1] 카르만 볼텍스 (Karman Vortex)

'카르만 볼텍스'란 원통형 장애물 뒤로 반복적인 소용돌이 패턴이 번갈아가며 나타나는 현상을 일컫는다. 소규모 카르만 볼텍스 현상으로는 주로 공장 굴뚝에 의한 소용돌이, 강물에 나무막대기가 꽂혀있을 때 그 뒤로 나타나는 소용돌이 등을 예로 들 수 있다.



[그림2] 제주도 카르만 볼텍스 현상 위성사진  
위의 이미지는 MTSAT 기상위성이 우리나라를 적외선 관측한 결과물로 지난 1월 24일 15:33 경의 사진과 2월 16일 아침 07:00 경에 제주도 남쪽으로 뚜렷한 소용돌이 모양이 나타나는 것을 볼 수 있다. 카르만 볼텍스 현상 자체 대한 이론적인 연구는 다수 존재하나, 제주도의 사례와 같이 대규모 기상현상으로써의 카르만 볼텍스에 대해서는 아직 전문적인 연구가 미비하다. 카르만 볼텍스 현상은 기온 역전이 존재하는 넓은 바다 한가운데에 높은 산이 있고 강력한 바람이 일정하게 불어야 하는 등 복잡한 조건에서 일어난다고 알려져 있다. 그러나 이러한 조건 또한 카르만 볼텍스가 일어나는 제주도의 기상상황을 단순히 설명한 것 뿐 실제로 동일한 조건에서 일어나는지에 대한 규명은 아직 되어있지 않다. 제주도는 전 세계에서 가장 큰 규모의 카르만 볼텍스가 주기적으로 발생하는 지역이며, 시기도 10월부터 4월까지로 매우 일정한데 이러한 이유에 대해서도 밝혀진 바가 없다.

카르만 와류는 2015년 무렵 제2롯데월드 건설 과정에서 화제가 된 적이 있다. 제2롯데월드는 초고층 건물이기 때문에 강풍이 불면 건물 주변에 카르만 와류가 형성되어 비행기 항로에 영향을 준다는 내용이다. 특히 제2롯데월드에서 직선거리로 불과 2km밖에 떨어지지 않은 거리에 서울공항이 있기 때문에 비행체의 안전성에 대한 논란은 끊이지 않았다.



[그림3] 건물에 의해 일어나는 카르만 볼텍스  
본 연구에서는 카르만 볼텍스 현상 자체에 대해 의문을 품고 발생조건 및 제주도에서만 해당 현상이 발생하는 원인에 대하여 규명해내고자 한다.

#### 나. 연구 목적

먼저 앞서 연구동기에서 밝힌 바와 같이 카르만 볼텍스의 발생조건과 제주도에서만 발생하는 원인을 분석한다. 이를 위해 본 연구에서는 카르만 볼텍스가 발생하는 발생조건을 모의 축소실험과 유체역학 시뮬레이션을 통해 알아보고자 한다. 또한 이를 통해 카르만 볼텍스를 완화시키거나 이를 활용할 수 있는 방안에 대해 연구하여 비행기의 안정성 문제나 카르만 볼텍스로 발생하는 소음문제, 수상생물에서의 카르만 볼텍스의 적용 등 다양한 분야에서 카르만 볼텍스를 해결하거나 활용할 수 있는 방안을 마련하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 가. 유체역학 방정식

#### 1) 유체의 운동에 관한 기술

유체가 움직일 때 그 흐름은 두 가지 유형 중의 하나로 특징지을 수 있다. 한 특정한 점을 지나 모든 입자가 이전에 이 점을 지나간 입자

들의 궤적을 따라 연속적으로 움직일 때, 이러한 흐름을 유선형 흐름 또는 층흐름이라고 한다. 정상흐름 상태에서 서로 다른 유선은 서로 교차하지 않으며, 어떤 점에서나 유선은 그 점에서의 유체 속도 방향과 일치한다.

반면에 어느 속도 이상이거나 속도의 급격한 변화를 일으키는 조건에서는 유체의 흐름이 매우 불규칙해지는데, 이를 난류라 한다. 유체의 이러한 불규칙한 운동을 맴돌이 흐름이라고 하며, 난류의 특징 중 하나이다.

유체에 관해 논의할 때, 점성이라는 용어는 유체의 내부 마찰 정도를 나타내는데 사용된다. 이러한 내부 저항은 서로 상대적 속도를 갖는 인접한 유체의 두 층 사이의 저항과 연계되어 있다. 유체운동의 많은 특성은 이상유체의 거동으로 간주하면 이해할 수 있다.

#### ◎ 이상 유체

- ① 유체의 점성이 없다.
  - ② 비 압축적이다. 즉, 밀도가 일정하다.
  - ③ 유체 운동이 일정하다. 유체의 각 지점에서 유속과 밀도 압력이 시간에 따라 변하지 않는다.
  - ④ 난류 없이 움직인다. 이것은 유체의 각 부분의 각속도가 그 부분의 중심에 대해서 0이 됨을 의미한다. 즉, 흐르는 유체에서 소용돌이 흐름이 생길 수 없다는 것을 의미한다.
- 그러나, 이상유체에서는 유체의 점성을 무시하고 난류현상이 없다는 가정을 가지고 있기 때문에 우리의 연구에서는 유체를 이상유체라고 간주하지 않는다. 즉, 유체의 운동을 서술할 때 유체에 점성이 존재하며, 유체 각 부분의 각속도가 존재한다고 생각한다.

#### 2) 연속 방정식

유체 내의 입자들이 정상 흐름 상태에서 유선을 따라 움직일 때 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\Delta x_1 = v_1 \Delta t \quad (1)$$

$$\Delta M_1 = \rho_1 A_1 \Delta x_1 = \rho_1 A_1 v_1 \Delta t \quad (2)$$

$v_1$  : 해당 지점에서의 유체의 속력

$A_1$  : 해당 지점에서의 관의 단면적

$\Delta t$  : 작은 시간간격

$\rho_1$  :  $A_1$ 에서의 유체의 밀도

식 (1)은 작은 시간간격 후 관의 아래쪽 끝으로 들어간 유체가 이동한 거리를 나타낸 식이다. 식 (2)는 해당 지점의 관의 단면적이 주어졌을 때 작은 시간간격동안 지나간 유체의 질량을 말한다. 같은 방법을 관의 위쪽 끝에도 적용하면

$$\Delta M_2 = \rho_2 A_2 \Delta x_2 = \rho_2 A_2 v_2 \Delta t \quad (3)$$

위와 같은 식을 얻어낼 수 있다.

이 때 관을 들어온 유체의 질량과 관에서 나간 유체의 질량은 같아야하므로,

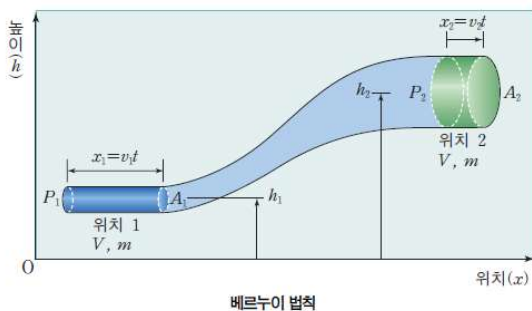
$$\Delta M_1 = \Delta M_2 \quad (4)$$

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (5)$$

식 4에 의해 식 5가 성립한다. 비압축성 유체의 경우 관 양단의 밀도가 일정하지만, 카르만 볼텍스 현상은 이상 유체가 아닌 실제 유체에서 일어나는 현상이기 때문에 식 5와 같이 밀도가 포함된 식을 사용해야 한다. 이러한 방법으로 우리는 하나의 흐른 유체의 두 부분에서의 부피 흐름률이 같다는 연속방정식 대신 연속방정식에 밀도가 곱해진 꼴을 사용해야만 하는 것이다.

### 3) 베르누이 방정식

유체가 단면의 넓이와 높이가 변하는 관을 통과하며 흐를 때, 압력은 관의 위치에 따라 변하게 된다. 베르누이 방정식은 에너지 보존이 이상 유체에 적용될 때 얻어지는 결과이다.



[그림3] 베르누이 방정식의 모식도

베르누이 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2 \quad (6)$$

베르누이 방정식은 유선 상의 모든 점에서 압력

$P$ , 단위 부피당 운동 에너지  $\frac{1}{2} \rho v^2$ , 단위 부피당

위치 에너지  $\rho g h$ 의 합이 같음을 말한다.

### 나. 카르만 와류

높은 화산섬이나 격리된 높은 산 같은 장애물이나, 고층의 구조물을 가로지르는 대기의 흐름 혹은 물속의 구조물을 지나는 물은 구조물을 통과한 뒤에 연속적인 와류를 형성하게 된다. 이는 카르만 와류라고 칭하며, 우리 주변에서는 축구공과 같은 둥근 물체가 회전 없이 날아갈 때 마주 오던 공기가 뒤로 흐르면서, 공의 뒷면에 공기의 소용돌이가 위상을 번갈아 규칙적으로 생기는 효과 등에서 볼 수 있는 현상이다.

#### 1) 카르만 와류 현상의 물리적 기술

카르만 와류 현상을 일반화시킨다면, 일정한 유속을 가진 유체가 흐르는 경로에 무한한 원통형 물체가 있다는 가정으로 시작한다. 이때 유체는 원통형 물체의 반대편에 위상이 바뀌면서 와류를 형성하게 되는데, 물체의 반대편에서 와류는 주기적으로 분리된다. 원통형 물체의 굽은 면을 일정한 유속을 가진 유체가 통과하면서, 물체의 바로 뒤편에는 저기압이 형성된다. 이 때 원통을 지나쳐 온 고기압의 유체가 저기압 방향으로 꺾이는 힘을 받아 카르만 와류가 발생하게 된다.

#### 2) 카르만 와류 현상의 수식적 기술

##### 가) 레이놀즈 수(Re)

카르만 와류는 레이놀즈 수의 범위에 의해 유속의 특정 범위에서만 형성된다.

유체역학에서 레이놀즈 수(Reynolds number)는 "관성에 의한 힘"과 "점성에 의한 힘(viscous force)"의 비율로서, 주어진 유동 조건에서 이 두 종류의 힘의 상대적인 중요도를 정량적으로 나타낸다.

레이놀즈 수는 또한 유동이 층류인지 난류인지를 예측하는 데에도 사용된다. 층류는 점성력이 지배적인 유동으로서 레이놀즈 수가 낮고, 평탄하면서도 일정한 유동이 특징이다. 반면 난류는 관성력이 지배적인 유동으로서 레이놀즈 수가 높고, 임의적인 에디나 와류, 기타 유동의 변동(perturbation)이 특징이다.

레이놀즈 수의 정의는 다음과 같다.

$$Re = \frac{\rho v_s^2 L}{\mu v_s L^2} = \frac{\rho v_s L}{\mu} = \frac{v_s L}{\nu} \quad (7)$$

$v_s$  : 유동의 평균 속도

$L$  : 특성 길이

$\mu$  : 유체의 점성계수

$\nu$  : 유체의 동점성 계수

$\rho$  : 유체의 밀도

일반적으로 카르만 와류 현상은 이 레이놀즈 수의 값이 90 이상인 경우에 형성된다.

#### 나) 카르만 와류 주파수

선행연구의 일정 원통형 실린더를 지나는 유동을 수치해석한 결과, 특정 레이놀즈 수 90~5000 사이에서 원기둥의 후방 유동에 주기적인 카르만 와류가 관찰된다. 무차원화된 주파수  $St$  (Strouhal 수)는 다음과 같이 정의된다.

$$St = \frac{fD}{V} \quad (8)$$

$f$  : 와류의 주파수

$D$  : 원통의 지름

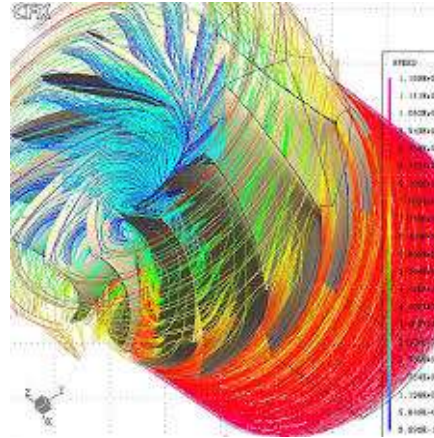
$V$  : 유속

$St$  : 스트로 해

일반적으로 카르만 와류가 무한 원통형 물체에 대해 발생하는 빈도는 스트로 해  $St = 0.22$ 의 값이 평균치이다.

#### 다. 수치해석모델링

전산 유체 역학(CFD, Computational fluid dynamics)은 유체 현상을 기술한 비선형 편미분 방정식인 나비에-스토크스 방정식을 FDM(Finite Difference Method), FEM(Finite Element Method), FVM(Finite Volume Method) 등의 방법들을 사용하여 유체의 움직임을 이산화하여 대수 방정식으로 변환한 후, 이를 수치 기법의 알고리즘을 사용하여 유체의 유동을 해석하는 것이다.



[그림5] CFD를 이용한 비행기 엔진 시뮬레이션  
CFD는 컴퓨터를 사용하여 공학 문제에서 유체와 기체의 상호작용을 시뮬레이션한다. 그러나, 방정식을 여러 가정을 통해 간단히 하거나 슈퍼 컴퓨터를 사용한다 하더라도, 대부분 근사해만을 얻을 수 있다. 적용 모델이 실제에 더욱 가까울수록 아음속이나 난류 문제와 같은 복잡한 현상의 시뮬레이션이 보다 정교해진다. 코드의 검증은 실험을 수행하여 얻은 정량적 정성적 데이터와 그 오차를 비교하여 이루어진다. 여러 가지 CFD 방법 중 높은 사양의 컴퓨터와 값비싼 소프트웨어가 필요한 방법이 있는가 하면, 간단히 앱을 설치하거나, 비트맵 파일을 편집하여서 누구나 손쉽게 모의로 시뮬레이션 할 수 있는 방법이 존재한다.

### 3. 탐구 과정 및 방법

#### 가. 탐구과정

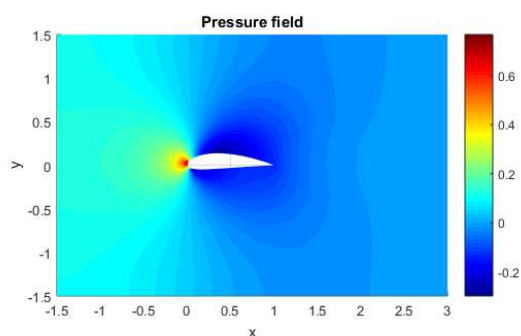
이번 제주도 자연탐구를 통해 카르만 볼텍스 현상의 원인과 효과를 조사하고, 왜 제주도에서만 카르만 볼텍스가 일어나는지에 대해 현장답사를 통해 원인을 파악하여 상사성을 유지하면서 카르만 볼텍스를 발생시킬 수 있는 최소한의 조건을 구하는 데에 목적이 있다. 먼저 현장답사 전에는 사전 연구 및 조사의 일환으로 카르만 볼텍스 현상의 정의와 이 현상을 설명하는 이론에 대해 조사하였다. 이를 위해 관련된 유체역학 이론들을 물리학 서적이나 논문 혹은 인터넷 웹사이트를 통해 찾아보고 이해하여 수식적으로 카르만 볼텍스 현상을 증명하거나 유도한다. 유체역학은 유체가 움직이면서 만들어



내는 모양의 변화를 해석하는 학문이기 때문에 이론적인 이해뿐만 아니라 직관적인 이해도 필요하다. 직접 눈으로 보고 이 현상이 어떻게 일어나는지를 탐구하기 위해 간이실험과 더불어 전산 유체역학 시뮬레이션(CFD, Computural Fluid Dynamics)을 시행할 것이다. 또한 제주도의 지형과 기후, 기상상황에 관한 사전조사도 병행하여 제주도의 기후에 대한 이해도를 높였다.

성산일출봉 답사 시에는 성산일출봉의 자세한 지형과 풍량, 풍속, 기후, 경사 각도 등을 알아보기 위해 기상 관측 장비를 이용한 정밀한 기상 관측 및 카메라를 이용하여 좀 더 자세한 높낮이를 측정하였다. 이러한 과정을 통해 성산일출봉의 풍향, 풍속, 기압 등의 세세한 정보까지도 동일하게 CFD 내에서 구현하였다.

답사 이후 수집한 자료를 바탕으로 전문 CFD 프로그램을 이용하여 제작한 3D 모델을 바탕으로 모의 풍동 실험을 수행하여 카르만 볼텍스 현상을 프로그램 내에서 재현하였다. 직접 제어할 수 있는 변인인 기압, 풍향, 기류의 상황, 지형 조건을 변화시켜가며 카르만 볼텍스 현상이 가장 많이 일어나는 극대점과, 카르만 볼텍스가 일어날 수 있는 최소 조건을 구하였다. 추가적으로 카르만 볼텍스를 이용할 수 있는 방안이나 줄일 수 있는 구조에 대해서도 고찰해봤다.



[그림6] MATLAB을 이용한 CFD의 구현

#### 나. 탐구 방법

본 연구에서는 앞서 소개한 카르만 볼텍스 현상과 한라산과의 관계를 이론적, 수식적으로 접근하기 이전에 카르만 볼텍스 현상에 대한 모

의실험을 진행하기로 하였다. 다음 모의실험은 카르만 볼텍스 현상을 직접 재현함으로써, 직접적인 관찰을 통한 폭넓은 이해와 위 현상이 발생하는 메커니즘에 대한 정성적인 이해를 목적으로 하고 있다. 모의실험은 총 2가지 방법으로 진행하고자 한다.

- 1) 카르만 볼텍스 현상의 유체를 물로 하여 현상 재현하기 - 카르만 볼텍스 현상은 이론적 배경에서 언급된 바와 같이 다양한 유체에서 발생하는 현상으로, 위 현상은 일정한 속력을 가진 유체와 그 유체의 경로를 가로막는 장애물이 존재할 때 일어난다. 이에 따라 실제로 한강에서도 유체가 물일 때 카르만 볼텍스 현상이 일어난다. 이에 본 연구팀은 대기에서 발생하는 카르만 볼텍스 현상에 관해 연구하기에 앞서 쉽게 실험이 가능하고 눈으로도 관찰이 비교적 용이한 유체인 물로 카르만 볼텍스 현상을 재현하고자 한다. 이때 물의 흐름은 잉크 방울을 이용하여 관찰한다.
- 2) 전산 유체 역학 프로그램의 시뮬레이션을 통한 카르만 볼텍스 현상 의 재현 - 실험 탐구는 카르만 볼텍스 현상을 직접 관찰할 수 있다는 장점이 있는 반면 탐구 과정 조작, 변인 통제 등에 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 보다 정확한 카르만 볼텍스 현상의 재현을 목적으로 여러 시뮬레이션 툴을 이용한 시뮬레이션을 통해 위 현상을 재현하여 여러 변인을 통제하고자 한다. 통제하고자 하는 변인은 제주도 자연탐사 전 조사한 이론 탐구 과정에서 설정하였다. 이론 탐구 과정에서 설정할 수 있는 변인을 장애물과 주변 환경으로 분류하여 각각 장애물을 변화시켜 만들 수 있는 변인으로는 장애물의 모양과 크기, 주변 환경으로부터 만들어낼 수 있는 조건으로는 풍속과 공기의 밀도, 기류의 균일성을 채택하여 이를 모델링을 통해 조사하였다. 또한 이론 탐구 과정에서 이론적으로 유도하였던 레이놀즈수와 와류의 주파수 등을 실제 시뮬레이션에 대입하여 이론값과 프로그램을 이용한 실험값을 대조하였다.
- 3) 3D모델링을 통해서 2D 모델링에서 구하기 힘들었던 한라산과 성산일출봉의 정량적 조건을 대입하여 카르만 볼텍스 현상을 재현한 후 3D의 단면에 해당하는 2D 시뮬레이션 결과를 3D

로 확장하여도 모순이 되지 않는지 확인한다.

#### 4. 이론 탐구 결과

##### 가. 카르만 볼텍스의 이론적 고찰

레이놀즈 수에 따른 와류의 형성

레이놀즈수는 이론적 배경에서 확인할 수 있듯이 관성에 의한 힘과 점성에 의한 힘의 비율로 나타내지는 무차원수이다.

레이놀즈 수의 정의는 다음과 같다.

$$Re = \frac{\rho v_s^2 L}{\mu v_s} = \frac{\rho v_s L}{\mu} = \frac{v_s L}{\nu} \quad (9)$$

$v_s$  : 유동의 평균 속도

$L$  : 특성 길이

$\mu$  : 유체의 점성계수

$\nu$  : 유체의 동점성 계수

$\rho$  : 유체의 밀도

유체역학 시뮬레이션에서의 레이놀즈 수를 유도해보면

$$Re = \frac{VL}{\mu} = \frac{5 \times 0.03125}{\frac{1}{50000}} \simeq 7800 \quad (10)$$

이 된다. 일반적으로 카르만 와류 현상은 이 레이놀즈 수의 값이 90 이상인 경우에 형성되므로 CFD 내부에서도 카르만 볼텍스 현상을 관측할 수 있다.

##### 나. 스트로 해를 이용한 와류 주기 예측

이론적 배경에서 언급하였듯이 스트로 해는

$$St = \frac{fD}{V} \quad (11)$$

와 같이 나타내지므로, CFD 상황에서의 조건을 스트로 해에 대입하면,

$$St = \frac{fD}{V} = \frac{35.2f}{5} = 0.22, f \simeq 0.3125 = \frac{1}{32}$$

즉 카르만 와류의 주기가 32초라는 것을 파악할 수 있다.

#### 5. 실험 탐구 결과

##### 가. 모의 실험

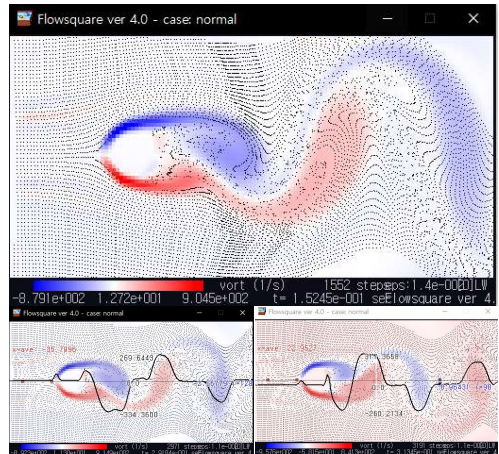
제주도 탐구 직전 시행하였던 모의 실험에서는 가시적으로 카르만 볼텍스 현상을 확인할 수 없었다.

##### 나. 전산유체역학 실험

###### 1) 2D 시뮬레이션

2D 시뮬레이션은 Flowsquare 4.0 프로그램을 이용하여 진행하였다. Flowsquare 프로그램은 일본의 Nora Scientific이라는 CAE(Computer Aided Engineering) 회사의 직원인 유키 미나모토(Yuki Minamoto)가 제작한 CFD 프로그램으로, 본 시뮬레이션에서 사용하는 2차원 버전과 3차원 버전 2가지로 존재한다. 일반적으로 유료 월정액으로 구매하여 사용해야 하지만 학생증을 이용하여 학생 인증을 받아 무료로 사용할 수 있었다.

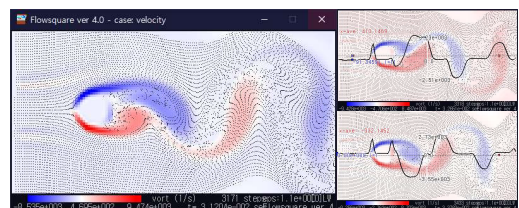
2D 시뮬레이션에서 이론적 연구 과정에서 설정한 독립변인을 각각 적용하여 실험결과를 해석하였다. 먼저 대조군으로 가장 기본적인 형태의 원통형( $r=5$ ), 기본 속도와 밀도( $v=5$ ,  $\rho=1$ )를 적용하여 시뮬레이션 하였다.



[그림7] 대조군 시뮬레이션 결과

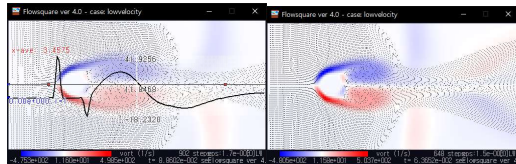
위 그림에서 카르만 와류가 좌우대칭적으로 균일하게 발생하는 것을 확인했다.

###### 가) 기저풍속에 따른 양상



[그림8] 높은 속력에서의 양상

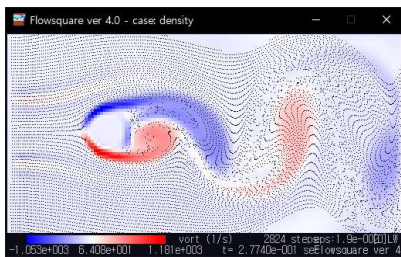
그림 8에서의 양상과 같이 기존 속력보다 높은 속력에서 카르만 볼텍스가 여전히 일어났고, 오히려 더 안정적이고 모습도 대칭적인 형태를 띄고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 레이놀즈 수와 유체의 속력과 비례하기 때문이라고 유추해볼 수 있다.



[그림9] 저속 상황에서의 양상

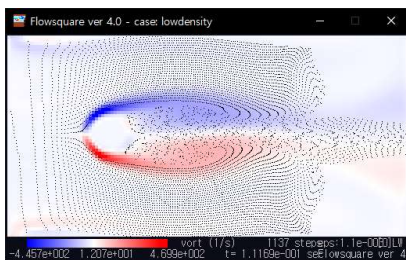
저속 상황에서는 카르만 볼텍스가 일어나지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 고속 상황에서의와 마찬가지로 레이놀즈 수가 너무 작기 때문이라고 유추할 수 있다.

나) 유체의 밀도에 따른 양상



[그림10] 고밀도 상황에서의 양상

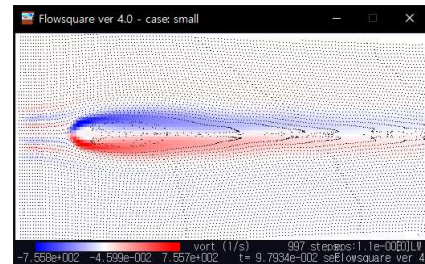
그림 10에서 확인할 수 있듯이 고밀도 상황에서도 카르만 볼텍스 현상을 관찰할 수 있었다.



[그림11] 저밀도 상황에서의 양상

저밀도 상황에서는 카르만 볼텍스가 발생하지 않았는데, 그래프의 개형이 저속도 상황에서의 개형과 비슷한 것으로 보아 밀도 부분도 레이놀즈 수를 충족시키는데 어떠한 영향을 주는 것으로 추론해볼 수 있다.

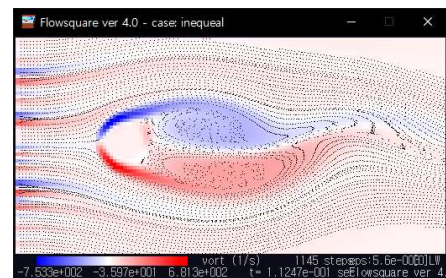
다) 원통의 크기에 따른 양상



[그림12] 작은 크기의 원통 양상

작은 크기에서는 역시 카르만 볼텍스가 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이는 유체의 속도 대비 크기일 것으로 추정할 수 있는데, 스트로해가 0.22 근방이 되도록 하는 직경과 속도여야 하기 때문이다. 큰 직경을 가진 원통에 대해서는 시뮬레이션 실험 도중 프로그램이 강제종료되어 실행하지 못했다. 차후에 좀더 나은 컴퓨터 환경에서 추가실험이 필요하다.

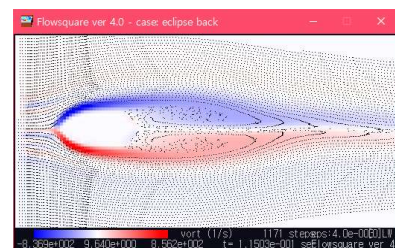
라) 불균일 상황에서의 양상



[그림13] 불균일 상태에서의 양상

유체의 흐름이 방향성은 존재하지만 불균일한 경우 그림12와 같이 카르만 볼텍스가 일어나지만 다소 치우친 형태로 일어나고, 불안정하여 생성되었다 소멸되었다를 반복하는 모습을 보였다. 이는 카르만 볼텍스가 생성되는 조건에 균일한 방향, 풍속의 바람이 오랜시간동안 불어야 한다는 조건을 CFD를 이용하여 증명한 것이 된다.

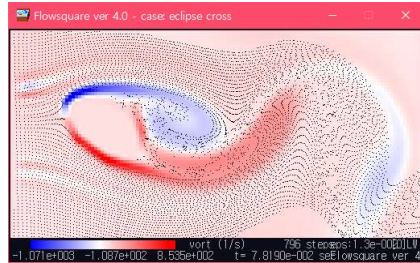
마) 타원 원통의 양상



[그림14] 수평방향 타원의 양상

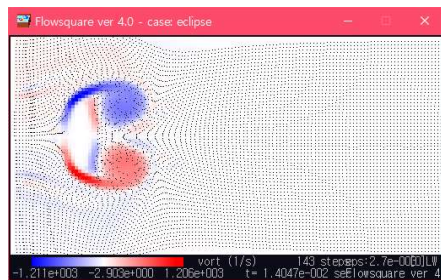


타원의 장축과 바람의 방향이 수평한 경우에는 타원이 마치 에어포일 형상을 띄는 것과 같아서 카르만 볼텍스가 일어나지 않는다.



[그림14] 기울어진 타원의 양상

타원의 장축이 그림 14와 같이 유체의 흐름 방향에 대해 45도 기울어진 상태에서는 카르만 볼텍스가 일어나긴 하나 불안정하고 한쪽으로 치우친 형태로 나타난다는 것을 알 수 있었다.

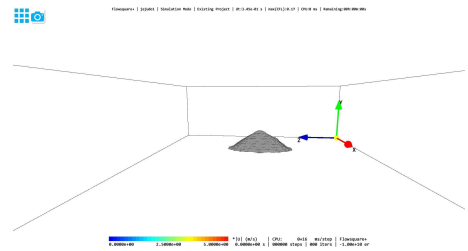


[그림 15] 수직방향 타원의 양상

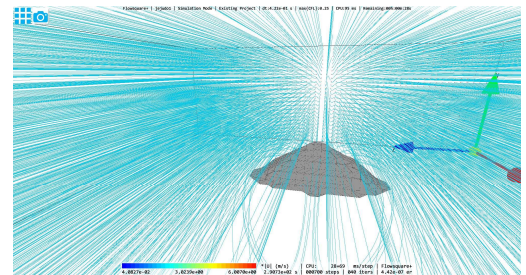
그림 15의 경우 시뮬레이션을 시작한 지 얼마 되지 않아 찍은 스크린샷인데, 이후에는 프로그램이 오류가 나 정지되어 스크린샷을 찍지 못했다. 장축이 바람의 방향에 수직인 경우 매우 안정한 기류를 형성하여 카르만 볼텍스가 일어나지 않을 것을 예측해볼 수 있다.

## 2) 3D 시뮬레이션

먼저 30도 정도의 평균 경사각을 가진 일반 산에 대한 실험을 해보았다.

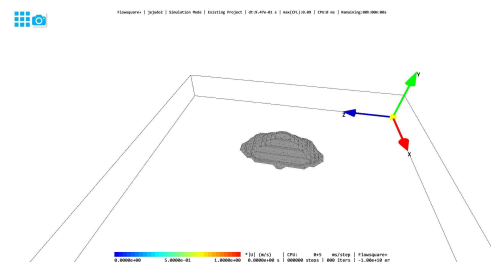


[그림16] 시뮬레이션 대상파일



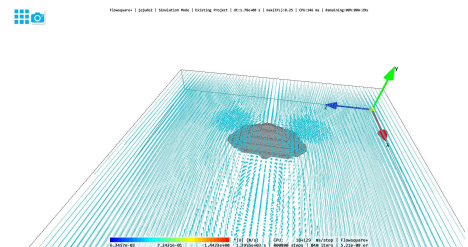
[그림17] 시뮬레이션 결과

그림 17에서 볼 수 있듯이 산의 모양이 완전히 대칭이고, 그 대칭축이 바람의 방향과 동일하기 때문에 양쪽의 소용돌이가 완전히 동일하게 일어나 오랜시간 관찰할 경우 유선 또한 대칭을 이루는 것을 확인할 수 있다.



[그림18] 시뮬레이션 대상파일

이번에는 제주도와 비슷한 경사각을 가진 15~20도의 산의 파일을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다.



[그림19] 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 초기에는 잠시동안 바람의 반대방향에서 카르만 볼텍스가 일어나는 것을 확인할 수 있었지만, 이후 시뮬레이션이 진행되어 상황이 안정화된 이후에는 위의 상황과 같이 완전히 대칭적인 형태



로 변한 것을 알 수 있다. 실제로는 카르만 볼텍스가 일어나는 제주도를 대입했음에도 카르만 볼텍스를 초반부분에만 확인할 수 있다는 것은 카르만 볼텍스가 완전한 대칭, 평형상태에서 일어나는 현상이라기보다는 국소적인 압력 차이가 나타나야지만 비로소 진행되는 현상이라는 것을 확인할 수 있었다.

## 6. 실험 결과 해석

### 가. 장애

## 7. 기대효과

가. 우리는 본 연구를 통해서 '카르만 볼텍스'에 대한 연구를 통해 연속적이고 규칙적인 소용돌이에 대한 수치적, 이론적 해석을 할 것이며, 거대 규모의 카르만 볼텍스가 일어나기 위한 조건 및 원인을 제주도의 모델로부터 찾아낼 것이다. 또한 모의실험이나 3D 모델링을 이용한 전산 유체역학 시뮬레이션(CFD Simulation, Computeral Fluid Dynamics Simulation)을 통해 여러 변인을 바꿔가며 카르만 볼텍스 현상의 최소 및 적정 조건을 확인할 것이다. 이를 통해 카르만 볼텍스 현상으로 인해 발생하는 문제점을 해결하고 이를 유익한 방향으로 이용할 수 있는 방안 또한 검토할 것이다.

대규모 카르만 볼텍스 현상은 비행기의 항로에 큰 문제를 야기한다. 대규모 소용돌이를 지나는 비행기는 카르만 볼텍스의 영향을 받아 이착륙에 지장이 있다. 또한, 카르만 볼텍스 현상이 일어나는 공간에서 주변 기단진동수와 와류의 발생 진동수가 일치하게 된다면 공기 흐름의 에너지의 공명으로 인해 공기가 큰 폭으로 진동하게 되며 이는 큰 소음을 일으킨다. 카르만 볼텍스 현상을 해결함으로써 위에서 제시한 문제들을 해결할 수 있을 것으로 보인다.

추가적으로 카르만 볼텍스를 활용할 수 있는 방안으로는 풍력발전에서의 적용과 생체 구조에 적용 등이 있다. 현재 통용되고 있는 풍력발전기는 커다란 날개가 필요하고 상당히 큰 규모이며 유지보수 또한 힘들다는 단점이 있는데, 드물지만 날개를 사용하지 않고 카르만 볼텍스

현상을 이용하는 풍력발전기도 있다. 또한 어류가 헤엄을 치는 과정을 자세히 살펴보면 측면 지느러미에서는 물이 일정한 방향으로 움직이고 꼬리부근에서는 카르만 볼텍스 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 측면에서는 카르만 볼텍스 현상이 자유로운 헤엄을 방해하고 후면에서 발생하는 카르만 볼텍스는 오히려 추진력을 높이는 효과가 있기 때문이라고 한다. 이러한 생물의 특성을 이용하여 전신수영복 제작이나 더 효율적인 배의 구조 등에 대해 탐색할 수 있을 것이다.

따라서 우리는 제주도에서 특징적으로 일어나는 제주도의 '카르만 볼텍스' 현상을 완화할 수 있는 모델이 제주도 뿐만 아니라 실생활의 구조물에서도 적용될 수 있을 것이라 기대한다.

## 8. 참고문헌

- [1] 김정현, 김규홍, C.F. Lange, C.R. Koch (2013). 오픈폼(OpenFOAM)을 활용한 본 카르만 와류의 오픈 루프 및 피드백 제어를 위한 원형 실린더 주위의 전산해석 연구. 한국항공우주학회 학술발표회 논문집. 65-71
- [2] 김형권, 김진우 (2018). 칼만 와류 영상을 이용한 속도장 추정. 한국정보통신학회논문지, 22(10), 1327-1333.

[3] 이은석 (2018). 원통 후방에서 생성되는 주기적 와류의 비정상 점성유동 수치해석. 한국추진공학회 학술대회논문집, 411-413.