

# 압력 조절 장치를 갖는 풍동 지면판에 관한 수치해석적 연구

이 민 재,<sup>1</sup> 김 철 완<sup>\*2</sup>

## NUMERICAL STUDY ON WIND TUNNEL GROUND PLATE WITH A PRESSURE CONTROL DEVICE

M.J. Lee<sup>1</sup> and C.W. Kim<sup>\*2</sup>

*Preliminary design of a ground plate, a device installed close to the aircraft model for wind tunnel test to simulate the ground effect, was performed by a numerical simulation. A two-dimensional numerical study was performed initially to decide the optimal leading edge and flap configurations. Then, three-dimensional studies were conducted to decide the optimal flap deflection angle for pressure distribution reduction since the plate and the plate supporting system generate static pressure difference between the upper and lower flow regions. Three-dimensional simulation additionally studied the effect of the clearance between the plate and the wind tunnel side wall. For the efficiency of computation, half model was simulated and a symmetric boundary condition was applied on the center plane. Based on the preliminary design, a ground plate was designed, manufactured and tested at the Korea Aerospace Research Institute(KARI) wind tunnel. The measured pressure differences versus flap deflection angle agreed well with the predicted results.*

**Key Words** : 지면판(Ground Plate), 전산유체역학(CFD), 지면 효과(Ground Effect), 풍동 실험(Wind Tunnel), 압력 조절 장치(Pressure Control Device)

### 1. 서 론

일반적으로 비행체가 지면과 근접하게 되면 공기역학적 특성이 달라지게 되는데, 이러한 지면 효과에 의한 공기역학적 특성 변화에 관한 연구는 실험적 방법과 수치해석적 방법으로 수행되어 왔다. 지면 효과 재현 장치를 운용하는 풍동 실험은 지면 효과를 고려하기 위하여 추가적인 실험 장치가 별도로 요구되게 된다. 일반적인 지면 효과 재현 장치로는 경계층의 흡입과 분출(suction, blowing), 이동 지면(moving belt), 그리고 풍동 시험부 내부에 설치되어 수직 높낮이의 조절이 가능한 고정형 지면판(ground pate)이 있다. 경계층 분출 방법은 풍동 바닥에서 수평으로 유동을 분출하여 상대 속도를 발생시키고, 경계층을 제거하는 방법으로 많은 유량을 필요로 한

다. 그리고 이동 지면 방법은 풍동의 바닥면을 자유류의 속도와 같은 속도로 움직이게 하는 방법으로 지상 운송체의 주행 조건을 가장 잘 만족시키는 방법이지만 장비 제작에 많은 비용을 필요로 하며, 움직이는 벨트의 장력 조절과 이동 지면의 아래쪽으로 작용하는 양력을 제어하기 위하여 벨트의 아래쪽에서 별도의 유동 흡입 장치가 필요하다. 특히 이동 지면 방법은 오랜 시간 사용하기 위하여 벨트의 수명과 표면의 거칠기 등의 다양한 요소가 지면 효과 모사에 많은 영향을 주기 때문에 충분히 고려를 하여야한다. 고정형 지면판과 흡입의 경우에는 실험 모델과 지면과의 상대 속도는 모사할 수 없다는 단점이 있지만 경계층만을 제거해주는 가장 간단한 지면 효과 재현 장치로써 제작 비용이 다른 지면 효과 재현 장치에 비하여 상대적으로 저렴하며, 특히 고정형 지면판의 경우에는 다른 지면 효과 재현 장치에 비해 제작과 설치 및 조립이 손쉽게 이루어 질 수 있다는 장점이 있다[1,2].

고정형 지면판은 풍동 내부에 설치되어 높낮이의 조절이 가능하고, 수평 및 수직 하중에 대하여 견딜 수 있으며, 또한 수평 유지 및 운용이 가능하여야 한다는 조건으로 인해 지면판의 하부에 여러 가지 구조물들을 추가로 설치하게 된다. 따

접수일: 2010년 10월 6일, 수정일: 2010년 11월 26일,

게재확정일: 2010년 12월 3일.

1 정회원, 과학기술연합대학원대학교 항공시스템공학과

2 정회원, 한국항공우주연구원 첨단공력구조팀

\* Corresponding author, E-mail: cwkim@kari.re.kr

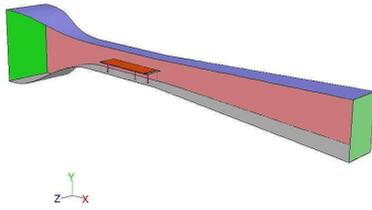


Fig. 1 Ground plate in KARI wind tunnel

라서 지면판은 상하 비대칭 형태의 구조를 갖게 되고, 이로 인하여 지면판을 기준으로 윗면과 아랫면에서의 압력의 차이가 발생하게 된다. 상하 비대칭 구조에서 발생하는 압력 차이는 지면판의 상하에 압력 불균형을 초래하고, 이로 인하여 수직 하중이 발생하게 되며, 또한 지면판의 끝단과 풍동 벽면 사이의 간극을 통해서 수직 방향의 유동을 발생시키는 원인이 된다. 따라서 지면판의 뒷전(trailing edge)에 지면판과 연결되는 압력 조절 장치를 이용하여 압력 불균형을 해소하는 것이 매우 중요하다. 가장 일반적인 압력 조절 장치로 플랩(flap)을 이용하는데, 플랩은 지면판의 뒷전에 위치하여 외부에서 원격으로 각도 변경을 손쉽게 할 수 있어야 하며, 각도 변경을 통하여 상하 비대칭 형태의 구조에서 발생하는 압력 차이를 줄이는 역할을 하게 된다. 본 연구는 항공우주연구원의 풍동에 필요한 지면판의 설계 및 제작에 앞서 지면판 전두부 형상(leading edge), 플랩 및 지면판과 풍동 벽면 사이의 간극에 대한 설계 개념을 정립하기 위하여 전산 유체 기법을 활용하여 수행되었다. 한국항공우주연구원(KARI)의 풍동은 가로 10 m, 세로 4 m, 높이 3 m의 폐쇄형 시험부를 가지며, 수치 해석의 영역은 시험부 수축부, 확장부를 포함하였다.

본 연구에서는 풍동 내부에 설치되어 운용되는 고정형 지면판에 대한 2차원 및 3차원 해석을 수행하였으며, 전산해석은 ANSYS사에서 제공하는 상용 코드인 fluent 코드를 활용하여 수행하였다. 유동의 난류 특성은 spalart-allmaras 1 equation 모델을 활용하여 근사화하였고, 3차원 격자는 계산 시간을 줄이기 위하여 대칭 경계 조건을 설정하여 풍동 시험부의 중심면을 포함하여 한쪽만을 형성하였다.

## 2. 지면판 모델 및 전산 해석 조건

### 2.1 지면판 앞전 및 압력 조절 장치 모델

지면판 앞전(leading edge)의 형상에 따른 공력 특성 및 플랩의 각도 변화에 의한 지면판의 공력 특성을 파악하고자 2

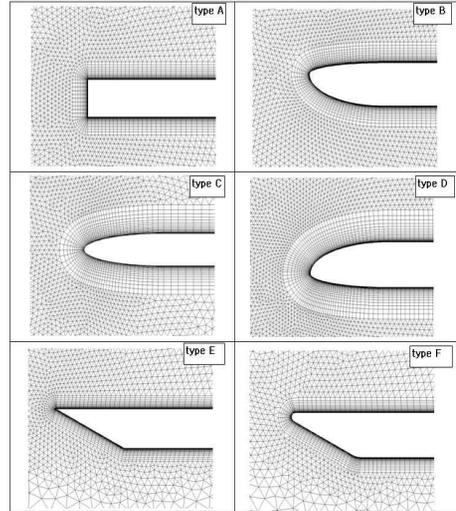


Fig. 2 Various design of leading edge

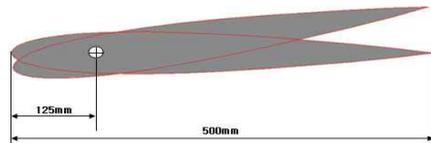


Fig. 3 Pressure control device(NACA0012)

차원 전산 해석을 우선적으로 수행하였다. 지면판의 앞전은 지면판에 탈부착이 가능한 형태로 제작에 어려움이 없어야 하며 박리영역이 크지 않아야 한다는 조건을 가지고 있다. 여러 형태의 앞전 형상에 대하여 전산 해석을 수행한 결과 기계 제작 과정에서의 어려움을 피하고, 지면판과 손쉽게 탈부착이 가능하도록 하기 위하여 타원 형태를 가지는 type C의 앞전 모델을 선택하여 전산 해석을 수행하였다.

압력 조절 장치로 사용 될 플랩 역시 같은 조건으로 NACA0012 익형을 선택하였으며, 실제 풍동 실험시에 지면판과의 설치를 고려하여, 지면판의 끝단과 10 mm의 거리를 두어 전산 해석을 수행하였다.

플랩의 전체 길이는 500 mm이고, 플랩의 앞전에서부터 25 % 떨어진 지점에 회전축이 위치한다.

3차원 전산 해석에 사용된 플랩 각도 조절 모터에 대한 정확한 묘사에 어려움이 있어 모터의 전체 크기 및 형상을 고려하여 개략적으로 설계를 하였으며, 지면판을 구성하는 모든

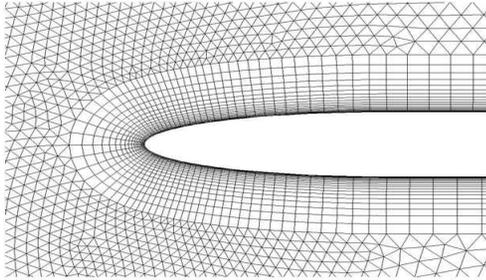


Fig. 4 Boundary layer of the leading edge

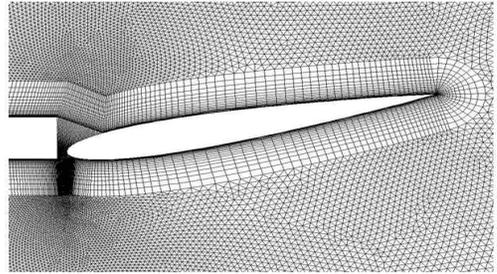


Fig. 5 Boundary layer of the trailing edge and flap

구조물들이 최종적으로 조립이 된 형상은 아래의 Fig. 9에 나타내었으며, 풍동 시험부 중심면과 일치하는 지면판의 중심을 기준으로 완벽하게 좌우 대칭 구조를 가지는 것을 확인할 수 있다.

### 2.2 전산 해석 조건

경계층 높이는 경계층 격자 크기를 결정하기 위하여 난류 경계층 높이를 예측하는 식 (1)을 활용하였다.

$$\delta \approx 0.37 \times L \times Re^{-0.2} \quad (1)$$

지면판의 운용 조건인 시험부에서 자유류의 속도는 60 m/s로 설정하였으며, 풍동 벽면 경계층의 높이는 150 mm로 하였다. 난류 모델은 S-A 모델을 적용하였으며, 3차원 지면판 해석에 사용된 총 격자 수는 약  $14 \times 10^6$  개이다.

지면판의 압력 측정 지점은 실제 지면판을 이용하여 실험할 경우 실험 모델이 위치하게 될 지점에서 측정하였다. 지면판의 앞전으로부터 2940 mm, 그리고 지면판의 중심에서 풍동의 벽면 방향으로 600 mm 떨어진 곳으로 지면판의 윗면과 아랫면의 압력을 측정하여 그 차이를 계산하였다. 지면판의 높이는 향후에 실험하게 될 모델과 지면판과의 거리 간격에 의하여 풍동 시험부의 바닥으로부터 570 mm(position A), 1170 mm(position B) 떨어진 높이에 위치하는 2가지 경우에 대하여 전산 해석을 수행하였다. Fig. 4와 Fig. 5에 3차원 전산 해석 지면판 모델의 앞전과 뒷전의 경계층 격자와 그 주변 격자의 단면 분포를 나타내었으며, 경계층의 높이는 식 (1)의 계산에 의하여 약 65 mm로 설정하였다.

## 3. 전산 해석 결과

### 3.1 2차원 전산 해석

2차원 모델은 지면판을 구성하는 다양한 하부 구조물들이 존재하지 않기 때문에 플랩을 10°의 각도로 변경하였을 때 압

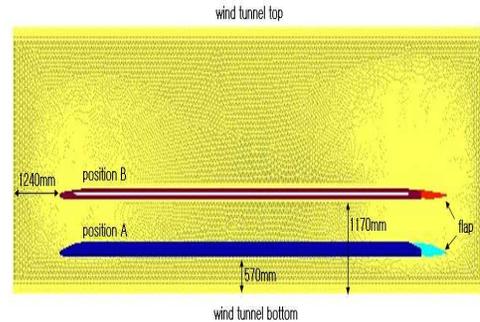


Fig. 6 Position A & B in wind tunnel

력 차이가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 플랩이 일정 각을 가지게 될 경우 캠버효과로 인하여 하부의 속도가 빠르고, 압력이 낮아지게 되므로 결국 2차원 전산 해석의 결과에서는 지면판을 구성하는 구조물들에 의한 영향은 고려할 수 없고, 플랩의 각도 변화에 따른 지면판의 압력 차이에 대한 영향만을 확인할 수 있다. 플랩 각도 0°의 경우 압력 차이는 position A에서 7.5 Pa, position B에서 0.3 Pa로 확인되었으며, 플랩이 10°의 경우에는 각각 -580 Pa, -458.7 Pa로 지면판 아랫면의 압력이 더 낮아짐을 확인할 수 있었다. 지면판과 풍동 벽은 벽면 경계 조건을 설정하였고, 난류 모델은 S-A 모델을 적용하여 전산 해석을 수행하였다. Fig. 8에 보여지는 것처럼 지면판의 대부분의 영역에서  $y^+$  값은 1에 근접한 값을 갖는 것으로 확인되었다.

### 3.2 3차원 전산 해석 결과

3차원 지면판 모델은 2차원과 달리 하부에 다양한 구조물들이 추가로 설치되는데 이로 인하여 지면판 아랫면의 압력이 증가하게 된다. 압력 조절 장치로 사용되는 플랩의 역할은 하부 구조물들로 인하여 증가하는 압력을 캠버효과를 통하여 감소시킴으로 지면판의 윗면과 아랫면의 압력 차이를 감소시키는데 있으며, 2차원 전산 해석의 결과 플랩이 각을 가질 경우 지면판 하부에서 유속을 증가시켜 압력을 감소시키고, 이

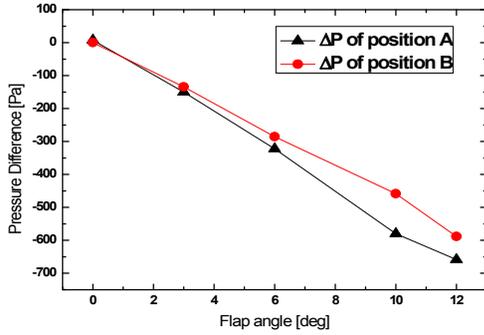


Fig. 7 Pressure difference vs flap deflection angle

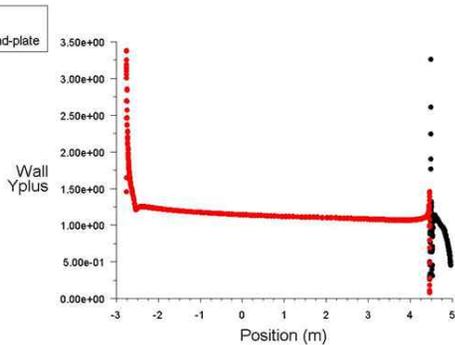


Fig. 8 Wall  $y^+$  distribution of ground plate and flap

를 통하여 상부와 하부의 압력 차이를 줄여줄 수 있다고 판단된다.

### 3.2.1 3차원 지면판 하부 구조물 모델링

지면판을 구성하는 구조물은 수직 높낮이의 조절 및 하중을 견딜 수 있는 수직 하중 지지대(strut)와 수평 하중 지지대(beam), 그리고 플랩과 연결되어 각도 변경을 플랩의 각도를 변경할 수 있는 플랩 각도 변경 모터(flap control motor)가 있다. 플랩 각도 변경 모터는 복잡한 형상을 갖지만 크기가 작아 형상을 단순화하여 모델링하였다. 지면판의 중심을 기준으로 완벽하게 좌우 대칭 구조를 가지는 것을 확인할 수 있으며, 전체 형태는 Fig. 9에 나타나 있으며, 플랩의 각도는 0°, 5°, 그리고 10°로 변경하면서 플랩 각도에 따른 지면판의 압력 차이를 확인하였다.

### 3.2.2 플랩 각도 변경에 따른 지면판 압력 차이

3차원 전산 해석은 지면판의 하부에 구조물들이 추가되면서 그에 따라 하부에 압력이 증가하게 된다. 따라서 추가되는 구조물들로 인한 압력 증가를 확인하기 위하여 구조물들을 하나씩 추가하면서 압력 차이를 측정하였다. 지면판과 플랩만



Fig. 9 3-dimensional design of the ground plate

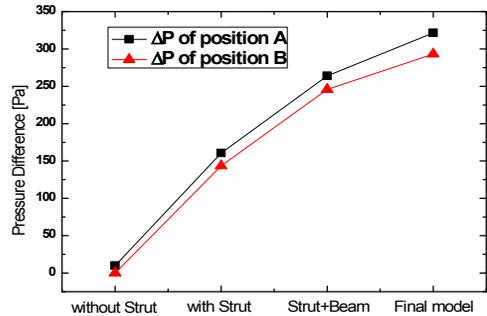


Fig. 10 3-D CFD result of pressure difference(flap angle=0°)

이 존재할 경우에 대한 3차원 전산 해석을 선행적으로 완료한 이후에 수직 지지대의 추가, 수평 하중 지지대, 각도 조절 모터까지 지면판을 구성하는 부품들을 추가하여 압력 차이를 확인하였다. 그 결과 하부 구조물들이 추가 될 경우마다 압력 차이는 증가하는 것으로 나타났으며, 완성된 지면판의 전산 해석 결과 압력 차이는 지면판이 position A와 B에 있을 때 각각 321 Pa와 293 Pa로 나타남을 확인하였다.

위의 결과로부터 지면판을 구성하는 하부 구조물을 추가할 때마다 상하 비대칭 구조로 인하여 압력 차이가 증가하는 것을 알 수 있었고, 플랩의 각도를 변경하였을 때 압력 차이가 감소하는지 확인하였다. 플랩의 각도는 0°, 5° 그리고 10°로 변경하면서 압력 차이를 확인하였다. 그 결과 플랩의 각도가 0°에서 10°로 증가할 때 지면판 압력 차이는 감소하며, 이를 통하여 플랩은 지면판의 압력 차이를 해소하기 위한 압력 조절 장치로써 그 역할을 충분히 수행할 수 있다고 판단된다.

지면판 앞전의 유선 형태를 살펴보면 플랩 각 0°에서 하부 구조물들로 인한 압력의 증가로 유동의 흐름이 윗 방향으로 향하는 것이 확인되었고, 플랩 각 10°의 경우에는 지면판의 압력 차이가 감소하여 유선 방향이 유동 방향과 나란한 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 13에서 보여지는 바와 같이 3차원 지면판 전산 해석 결과 플랩이 10°의 각도를 가질 경우에 압력 측정 지점뿐만

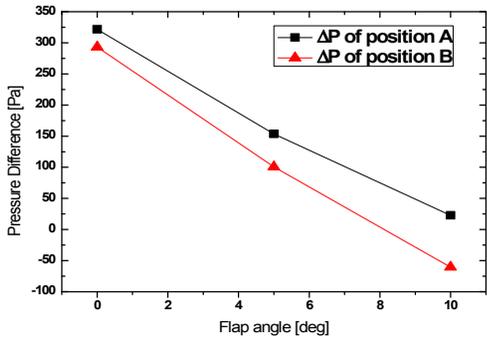


Fig. 11 3-D CFD result of pressure difference(flap angle=10°)



Fig. 12 Streamline of the leading edge at flap angle 0°

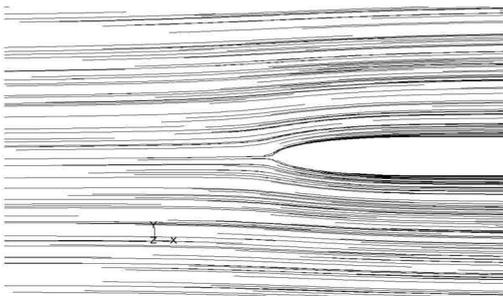


Fig. 13 Streamline of the leading edge at flap angle 10°

아니라 앞전에서 뒷전에 이르기까지 지면판의 전 영역에 걸쳐서 압력 차이가 작게 측정되는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2.3 3차원 지면판 간극 효과

3차원 지면판의 전산 해석을 수행한 모델은 풍동의 벽면과 지면판의 끝단(tip) 부분이 서로 맞닿아 있어서 간극이 존재하지 않는다는 것을 가정하였다. 하지만 실제 풍동 시험부에 지면판을 설치하고자 할 때에는 반드시 일정한 간격 이상의 간극이 확보가 되어야 지면판 및 지면판을 구성하는 기타 장치의 설치가 가능하게 되므로 간극이 지면판의 압력 차이에 미

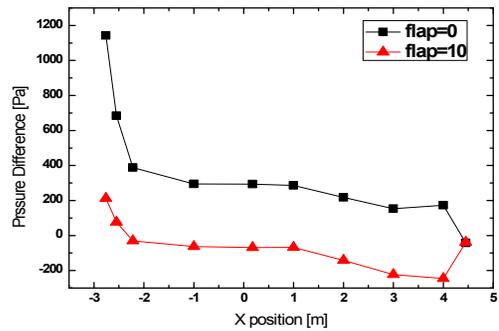
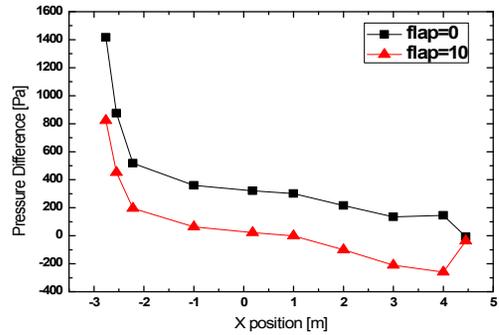


Fig. 14 Pressure distribution of the ground plate (top : position A, bottom : position B)

치는 영향을 분석하기 위해 전산 해석을 수행하였다. 지면판과 풍동과의 간극을 각각 5 mm, 10 mm, 15 mm 세 가지 경우로 설정하여 전산 해석을 수행하였고, 그 결과 지면판과 풍동 벽면과의 간극이 존재할 경우 하부 구조물들로 인하여 상대적으로 높은 압력이 작용하는 지면판 하부의 유동이 지면판과 풍동 벽면 사이의 간극을 통하여 하부에서 상부로 수직 방향의 유동 흐름이 발생하게 되는 것을 확인할 수 있었다.

이는 간극이 존재하지 않을 때보다 지면판의 상부와 하부에 작용하는 압력 차이를 줄이는 효과를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 지면판을 이용하여 시험 모델의 지면 효과 실험을 수행할 경우에는 시험 모델의 공력 특성에 영향을 미치는 부분이 될 수 있으므로 간극을 가지는 경우보다 압력 차이가 다소 높지만 간극을 제거하고 실험을 수행하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

Table 1 Pressure difference of the ground plate

Position	Flap angle	ΔP [Pa]
A	0°	321
	10°	22
B	0°	293
	10°	-68

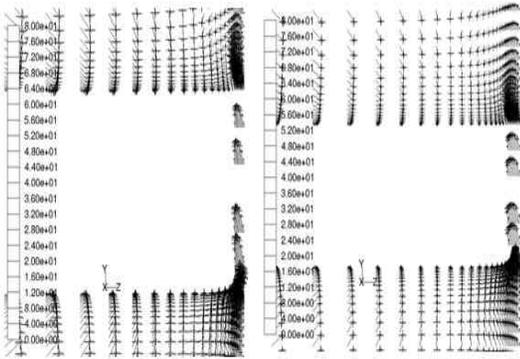


Fig. 15 Cross-sectional velocity vector distribution with clearance (Left : 5 mm clearance, Right : 10 mm clearance)

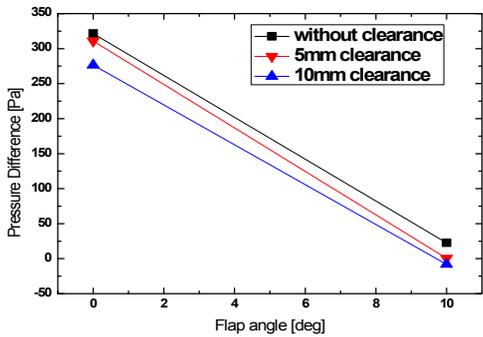


Fig. 16 Clearance effect of position A

#### 4. 지면판 풍동 실험

##### 4.1 지면판 제작, 설치 및 풍동 실험

CFD 결과를 바탕으로 지면판의 앞면 형태는 다원형을 갖는 동일한 모양으로 설계를 하였고, 지면판의 전체 길이는 풍동 실험부 내부에 정확하게 설치가 될 수 있도록 7 m로 설계하였으며, 압력 조절 장치로 사용 될 플랩은 NACA0012로 제작하였다. 풍동을 운용하는 상태에서 수평 및 수직 하중에 견딜 수 있으며, 수직 높낮이의 조절이 가능하여야 하기 때문에 수직 하중 지지대는 나사 형태를 갖는 다리를 사용하였다. 압력 측정 지점의 윗면과 아랫면의 동일한 위치에 압력 탭을 설치하여 압력을 측정하였다. 마지막으로 풍동 내부에 지면판 설치가 가능하도록 지면판과 풍동과의 간극은 15 mm로 설계하였으며, 지면 효과 시험 수행시에는 고무를 이용하여 지면판과 풍동 벽 사이의 간극을 제거할 수 있도록 하였다. 제작된 지면판을 시험부 내부에 설치한 후 플랩 각을 변경하면서 지면판 상하부의 압력 차이를 측정하여 그 결과를 CFD 해석 결과와 비교하였다.

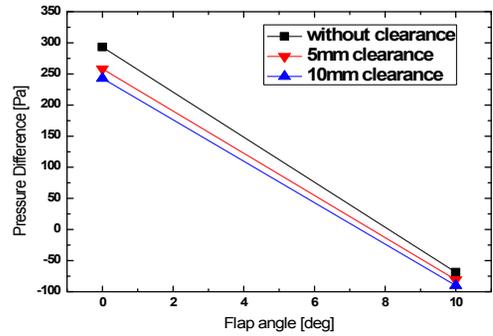


Fig. 17 Clearance effect of position B



Fig. 18 Parts of the ground plate I

전산 해석 결과와의 비교를 위해 시험부의 유속을 60 m/s로 설정하였다. 풍동 시험에서는 간극이 약 7.5 mm가량 존재하는 상태로 수행하였고, 각 연결부의 고정 장치 등의 이유로 인하여 전산 해석 모델과 실험 모델의 형태가 정확하게 일치하지 않는 점 등의 이유로 인하여 전산 해석 값이 실험 결과 값과 약간 다른 결과를 보이지만, 압력 차이 곡선이 플랩 각도 0°에서 10°까지 증가할 때 선형적으로 감소하는 유사한 형태를 가진다.

지면판에 대한 전산 해석 결과와 실험 결과의 압력 차이 값이 플랩 각도 0°에서 전산 해석 결과 값이 약간 높은 값을 나타내는데 이는 전산 해석에 사용된 모델이 풍동 실험에 사용된 모델과 완벽하게 동일한 모델이 아닌 결과로 예측된다. 전산 해석에서는 지면판과 풍동 벽면을 연결하여 고정하는 고정 지지대가 생략이 되었고, 지면판의 끝단에 위치하는 플랩 각도 변경 모터와 플랩을 연결하는 힌지 그리고 전선 묶음 등에 대한 부분이 생략된 결과로 예측된다. 따라서 추후에는 벽면 고정 지지대와 여타 구성품에 대한 정확한 모델링이 추가되어야 할 것이며, 그에 따른 압력 차이 특성을 확인하여야 할 과제가 남아있다.



Fig. 19 Parts of the ground plate II



Fig. 20 The ground plate for wind tunnel test

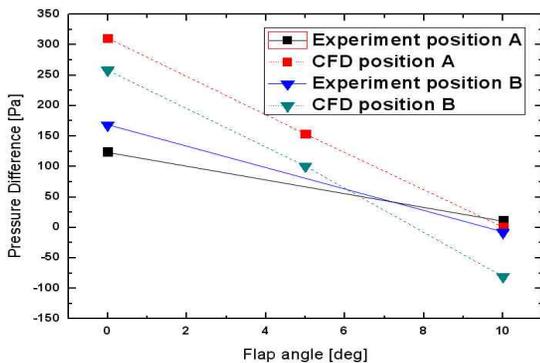


Fig. 21 Compare experimental data with CFD data

### 5. 결 론

본 연구에서는 널리 사용되는 지면 효과 재현 장치의 하나로써 설치 및 제작이 비교적 간단한 지면판에 대한 전산 해석을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 직접 지면판을 구성하는 부품들을 설계 및 제작하여 실험을 수행하여 전산 해석 결과를 검증하였다. 풍동 실험부에 설치되어 운용되는 고정형 지

면판은 상하 비대칭 구조로 인하여 필수적으로 압력 차이가 발생하게 되는데, 압력 조절 장치로써 플랩의 각도를 조절하여 지면판 하부에 캠버 효과를 유발하게 되어 유속을 증가시키게 되고, 이 결과 윗면과 아랫면의 압력 차이가 감소됨을 확인할 수 있었다. 따라서 제작이 용이한 플랩을 이용하여 지면판을 운용할 경우 압력 조절 장치로 충분히 사용이 가능하다고 판단된다.

또한 지면판 설치를 위하여 풍동 실험부의 벽면과 지면판의 끝단 사이에 일정 간격의 간극을 확보해야 되는데 전산 해석 결과 간극을 제거함으로써 압력 차이 값이 약간 증가하지만, 간극을 통한 수직 방향의 유동 흐름을 방지할 수 있다는 것을 확인하였다.

### 참고문헌

- [1] 2010, Lee, M.J., Kim, C.W. and Lee, D.S., "Preliminary Design of Ground Plate for Wind Tunnel Test with CFD," *Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology*.
- [2] 2010, 이민재, 김철완, "압력 조절 장치를 갖는 고정형 지면판에 대한 수치해석 및 풍동 실험," *한국전산유체공학회 추계학술대회는문집*.
- [3] 2002, 김태운, 권혁빈, 황재호, 이동호, 김문상, "다양한 지면 재현 기술을 적용한 고속 지상 운송체의 풍동 실험 연구," *한국자동차공학회 춘계학술대회는문집*.
- [4] 2007, 김윤식, 이재은, 김유진, 권장혁, "2차원 지면효과에 대한 난류 유동장 해석," *한국항공우주학회지*, 제35권, 제 8호, pp.661-669.
- [5] 2007, 김철완, "틸트로터 무인기의 지면 효과 분석을 위한 전산해석," *항공우주기술*, 제6권, 제1호, pp.14-18.
- [6] 김범석, 김만응, 이영호, "CFD에 의한 2D 에어포일 공력 특성 및 3D 풍력터빈 성능예측."
- [7] 1979, Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*.
- [8] 1990, Tomaru, H. and Kohama, Y., "Experiment of Wing in Ground Effect with Fixed Ground Plate," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp.370-373.
- [9] 2001, Anderson, J.D., *Fundamentals of Aerodynamics; Turbulent Boundary Layer*, pp.839-848.
- [10] 2007, Ahmed, M., Takasaki, T. and Kohama, Y., "Aerodynamic of a NACA4412 Airfoil in Ground Effect," *AIAA Journal*.
- [11] 1985, Gerhart, P.M. and Gross, R.J., *Fundamentals of Fluid Mechanics*.
- [12] 2003, *Fluent user's manual*, v6.1, Fluent Inc.