



중첩 격자 기법을 이용한 지면 효과를 받는 RAE 101 익형의 공력 해석

이재은¹, 김윤식², 김유진¹, 권장혁³

AERODYNAMICS OF THE RAE 101 AIRFOIL IN GROUND EFFECT WITH THE OVERLAPPED GRID

J.E. Lee¹, Y. Kim², E. Kim¹ and J.H. Kwon³

It takes a lot of time and effort to generate grids for numerical analysis of problems with ground effect because the relative attitude and height of airfoil should be maintained to the ground as well as the inflow. A low Mach number preconditioned turbulent flow solver using the overlap grid technique has been developed and applied to the ground effect simulation. It has been validated that the present method using the multi-block grid gives us highly accurate solutions comparing with the experimental data of the RAE 101 airfoil in an unbounded condition. Present numerical method has been extended to simulate ground effect problems by using the overlapped grid system to avoid tedious work in generating multi-block grid system. An extended method using the overlapped grid has been verified and validated by comparing with results of multi-block method and experimental data as well. Consequently, the overlapped grid method can provide not only sufficiently accurate solutions but also the efficiency to simulate ground effect problems. It is shown that the pressure and aerodynamic centers move backward by the ground effect as the airfoil approaches to the ground.

Key Words: 지면 효과(Ground Effect), RAE 101 익형(RAE 101 airfoil), 중첩 격자 기법(Overlapped Grid Method), 공력 해석(Aerodynamic Analysis), 예조건화된 Navier-Stokes 방정식(Preconditioned Navier-Stokes Equations)

1. 서 론

위그(wing in ground effect)선은 순항 속도가 100~400 km/h 이고 양항비가 10~30 사이의 매우 효율적인 운송 수단으로 지면 효과를 이용한다. 또한, 여러 장점으로 인해 군사적, 상업적 목적 등 다양한 용도로 큰 잠재력이 있다[1]. 여기서, 항공기의 날개가 지면에 근접해서 운항하는 동안 양력과 항력이 변화하는 3차원적 현상을 지면 효과라 하는데, 날개 코드 방향과 스펀 방향 지면 효과로 분류할 수 있다[2]. 날개 코드 방향 지면 효과로 날개와 지면 사이의 유동이 정체되어 날개 아랫면의 압력이 증가하는 램(ram) 효과가 있다. 또한, 스펀 방향 지면 효과는 지면의 영향으로 날개 끝 와류로 구성된

내리 흐름(downwash)이 감소하여 유도 항력이 줄어들고 날개 끝 와류가 날개 스펀 방향으로 연장되어 큰 가로 세로 비를 가지는 현상이다[2]. 지면 효과를 정확히 해석하기 위해서는 3차원 난류 유동을 고려해야 하지만 본 연구에서는 예비 해석 단계로 2차원 난류 유동 해석만을 수행하였다.

지면 효과를 받는 익형을 해석할 때, 지면이 고정되어 있으면서 받음각과 지면에서의 높이가 변하기 때문에 각 조건에 따른 격자가 필요하다. 이러한 격자를 생성할 때 쉽게 접근하는 방법이 다중 블록 격자 생성 기법이다. 다중 블록 격자 기법은 영역 연결 기법이 간단하며 경계 영역의 물성치들이 연속적인 장점이 있으나, 부격자 간 경계면이 일치해야 하기 때문에 부격자 간의 의존성이 크다. 이와 같은 기법은 격자 생성에 연구자의 시간과 노력을 많이 필요한 것이 가장 큰 단점이다.

한편, 격자 생성 기법 중의 하나인 중첩 격자 기법은 영역 연결 기법이 다소 까다롭고 경계면에서 물성치를 보간해야 하는 단점이 있으나, 격자 생성에 있어서 부격자계가 서로 독

1 학생회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공
2 정회원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소
3 종신회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공
* Corresponding author E-mail: jhkwon@kaist.ac.kr

립적이다. 그러므로 해의 정확성에 대한 검증만 된다면 격자 생성에 있어서 매우 용이하다. 특히, 본 연구와 같이 지면에 서의 높이가 고정되어 있고 각 높이에 대한 받음각이 다양한 경우 격자 생성에 효율적이었다.

지면 효과에 의한 양향비의 증가는 마하수 0.6정도까지로 알려져 있는데[3] 실제 개발된 위그선은 0.1 ~ 0.4 정도의 마하수 영역에서 운항한다[4,5]. 본 연구에서는 이와 같은 압축성 저속 유동을 해석하기 위해 시간 항 예조건화 기법[6]을 적용하였고, $k-w$ Wilcox-Durbin(WD)+ 난류 모델[7]을 사용하여 난류 유동을 해석하였다. 중첩 격자 기법에 필요한 격자 생성 기법 및 여러 algorithm은 [8]를 참고하였다. 이러한 수치 기법들을 사용하여 지면 효과가 없을 때 RAE 101 익형의 공력 특성을 실험치[9]와 비교한 다음, 다중 블록 격자 기법과 중첩 격자 기법의 결과를 비교하였다. 최종적으로 지면 효과가 있을 때 중첩 격자 기법만을 적용하여 공력 특성을 분석하고, 실험치[10]와 비교하여 신뢰성을 살펴보았다.

2. 지배 방정식 및 예조건화 기법

점성 압축성 유동의 지배 방정식인 Navier-Stokes 방정식을 예조건화 기법을 적용하여 미분 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\Gamma \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f_i}{\partial x_i} = \frac{\partial f_{vi}}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$q = \begin{bmatrix} p \\ u_1 \\ u_2 \\ T \end{bmatrix}, f_i = \begin{bmatrix} \rho u_i \\ \rho u_1 u_i + \delta_{i1} p \\ \rho u_2 u_i + \delta_{i2} p \\ \rho u_i H \end{bmatrix}, f_{vi} = \begin{bmatrix} 0, \sigma_{ij} \delta_{i1}, \sigma_{ij} \delta_{i2}, u_j \sigma_{ij} + k \frac{\partial T}{\partial x_i} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

식 (1)에서 q 는 압력, 속도, 온도로 이루어진 원시 변수 벡터 행렬을, f_i 와 f_{vi} 는 각각 비점성, 점성 수치 유속(flux)을 의미한다. Γ 는 Weiss와 Smith의 예조건화 행렬(preconditioning matrix)로 [6]를 참고로 한다.

$$U_r = \min \left[c, \max(|U|), KU_{cut}, \frac{\mu}{\rho \Delta d} \cdot \sqrt{\frac{|\dot{p}'|}{\rho}} \right] \quad (3)$$

U_r 은 기준 속도 (reference velocity)로서 국소 예조건화(local preconditioning)기법에서 일종의 limiter 역할을 한다. 식 (3)에서 c 는 음속을 의미하고 본 연구에서는 K 를 0.5로 고

정한다. $U_{cut} = \min(U_\infty, c_\infty)$ 이고 p' 과 \dot{p}' 이 각각 격자 경계면의 왼쪽 오른쪽 계이저 압력을 나타낼 때 $\dot{p}' = (p_l + p_r)/2$ 의 관계가 있다. U_{cut} 과 \dot{p}' 은 Weiss와 Smith가 제안한 기준 속도에서 사용한 항을 수정하였다[11].

$k-w$ 난류 방정식에서 원천항 S 는 k 와 w 의 생성을 (P)과 소멸을 (D)의 합으로 구성되어 있다. μ_t 과 μ_i 가 각각 층류 및 난류 점성 계수일 때 층류 점성 계수는 Sutherland 법칙에 의해 결정되고 난류 점성 계수 $\mu_t = \rho a_\nu c_\nu^\circ (k/w)$ 로 결정된다[12]. 본 연구에서는 $k-w$ WD+ 난류 모델[7]을 적용하였고 관련된 모든 상수는[7,12,13]를 참고한다.

3. 수치 해석 기법

본 연구에서는 격자 중심 유한 체적법을 사용하여 지배 방정식을 이산화하였고 Roe의 FDS 기법을 적용하였다. 단, 예조건화된 지배 방정식은 예조건화 행렬에 의해 고유치가 보정되므로 인공 점성 항에 예조건화 효과를 반영해야 계속해서 해의 정확도를 보장할 수 있다[6]. 또한, 보다 정확한 해를 얻기 위하여 3차 정확도의 MUSCL(Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws)기법이 적용되었는데, 유동 변수로서 비보존 변수를 보정한 후 보존 변수를 계산하였다[14].

시간 전진 기법으로 DADI (Diagonalized Alternate Directional Implicit) 기법[11,15,16]이 적용되었다. 본 연구에서는 Navier-Stokes 방정식과 $k-w$ 방정식을 분리하여 시간 적분하기 위해 loosely coupled algorithm을 적용하였다. 이와 관련한 상세한 절차는[13]을 참고한다.

수렴 가속을 위하여 국소 시간 전진 기법을 사용하였는데, 예조건화 행렬에 의해 보정된 고유치와 난류 방정식에 사용된 근사 최대고유치를 고려하였다[11,13,14].

4. 중첩 격자 기법

Steger 등[17]에 의해 처음 제안된 Chimera 기법은 구성된 중첩 격자계와 중첩 격자계의 교차 영역에서 삼간 과정을 포함한다. 여러 개의 격자계들이 모여 하나의 격자계를 구성하는 중첩 격자 기법은 주격자계와 부격자계로 구분할 수 있으며, 격자 점들을 차분 점 혹은 정상 점, 홀 점, 삼간 점으로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 중첩 격자 홀 경계의 구성 및 절단을 위하여 zones of interface algorithm과 hole map algorithm을 적용하였다. 또한, 영역 연결 방법으로 비보존적 삼간 방법의 하나인 bi/tri-linear 방법을, 병렬 데이터 처리를 위해 병렬화된 중첩 격자 기법을 적용하였다[8].

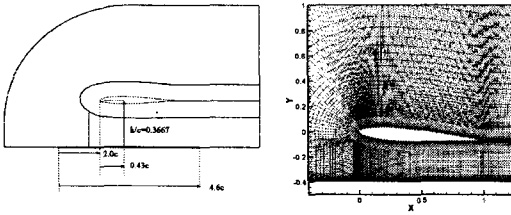


Fig. 1 Structure of multi-block grid system(54,685)

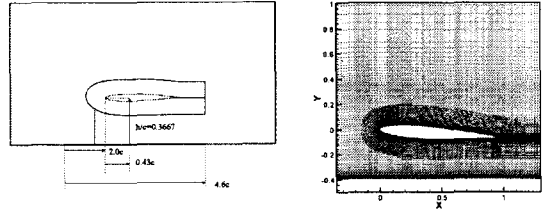


Fig. 2 Structure of overlapped grid system (64,540)

5. 수치 해석 조건

본 연구에서는 지면 효과가 없을 때와 있을 때 모두 RAE 101 익형을 사용하였다. RAE 101 익형은 Fig. 2나 3과 같은 코드 길이의 30% 위치에 최대 두께가 10%인 대칭 형상을 하고 있다.

5.1 지면 효과가 없을 때

지면 효과가 없을 때의 격자는 C형 격자로 격자점은 289×65개로 구성된다. 유동 조건은 [9]의 실험 조건과 동일하게 자유류의 속도는 100ft/s이고 레이놀즈 수는 1.6×10^6 이다. 받음각은 실험 조건을 포함하여 정상 상태로 해석할 수 없을 때까지인 0°에서 15.2°까지 계산하였다. 이 때, CFL 수는 5이고 총 4개의 CPU에서 해석을 수행하였다.

5.2 지면 효과가 있을 때

지면 효과가 있을 때의 실험치는 [10]를 참고한다. [10]에서 사용된 실험 장치는 11.5ft×8.5ft(4.6c×3.4c)의 test section, 30in. 길이의 RAE 101 익형, 11.5ft(4.6c)의 wooden ground board로 구성되어 있다. 지면에서의 높이는 7in.(0.23c), 11in.(0.37c), 15in.(0.5c)이고 받음각을 고려하였을 때 총 20가지 조건이 된다.

중첩 격자 기법을 검증하기 위해 사용한 다중 블록 격자와

중첩 격자는 모두 지면이 있을 때 Fig. 1과 Fig. 2와 같다. 먼저, Fig. 1의 다중 블록 격자는 3가지 형태의 부 격자가 하나의 격자를 구성하고 있는데 총 54,685개의 격자점으로 이루어져 있다. 다중 블록 격자는 받음각과 지면에서의 높이에 따라 각각의 격자를 구성하였다. Fig. 2의 중첩 격자는 사각형의 배경 격자와 익형 부근의 작은 C형 격자로 이루어져 있고 하나의 배경 격자를 생성한 후 익형 주위의 격자는 각 받음각 별로 생성하였다. 총 격자점의 수는 64,540개이다. 두 격자계는 실험 장치[10]를 참고하여 지면에서의 높이의 기준이 되는 위치가 익형 코드 길이의 43%이고, ground board는 익형 코드 길이의 4.6배로 앞전에서부터 2배되는 위치에서 시작한다.

실험 조건[10]과 동일하게 자유류의 속도는 100ft/s이고 레이놀즈 수는 1.6×10^6 이다. 비교한 높이와 받음각의 조건은 $h/c=0.23$ 일 때 $\alpha=3.81^\circ$, $h/c=0.37$ 일 때 $\alpha=0.20^\circ, 5.87^\circ, 8.63^\circ$, $h/c=0.50$ 일 때 $\alpha=0.16^\circ$ 로 모두 5가지 경우이다. 이 때 CFL 수는 3이고 다중 블록 격자는 6개, 중첩 격자는 10개의 CPU를 사용하였다. 지면에서의 경계 조건은 점성 no-slip 조건을 적용하였다.

중첩 격자 검증에 사용된 조건을 제외한 높이 및 받음각 조건은 모두 중첩 격자만으로 해석을 수행하였고 격자점의 개수, 유동 조건, 계산 조건 또한 위와 동일하다. 단, 각 지면에서의 높이 조건에서 받음각은 실험 조건 외에 정상 상태 해석이 가능한 경우까지를 포함한다.

Table. 1 Verification of overlapped grid approach

		C_1			C_2			C_{multi}		
h/c	α	multi-block	Chimera	experiment	multi-block	Chimera	experiment	multi-block	Chimera	experiment
0.23	3.81	0.5193	0.5213	0.519	0.0015	0.0014	0.004	-0.0065	-0.0066	-0.007
	0.20	-0.0091	-0.0092	-0.008	0.0016	0.0016	0.000	0.0090	0.0090	0.012
0.37	5.87	0.7344	0.7358	0.719	0.0026	0.0027	0.004	-0.0145	-0.0147	-0.012
	8.63	1.0120	1.0129	1.003	0.0063	0.0063	0.009	-0.0221	-0.0223	-0.024
0.50	0.16	0.0083	0.0082	0.016	0.0015	0.0015	0.000	0.0046	0.0046	0.003

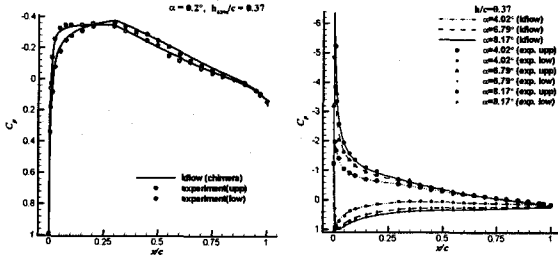


Fig. 3 Pressure coefficients when $\alpha = 0.20^\circ \sim 8.17^\circ$ and $h/c = 0.37$

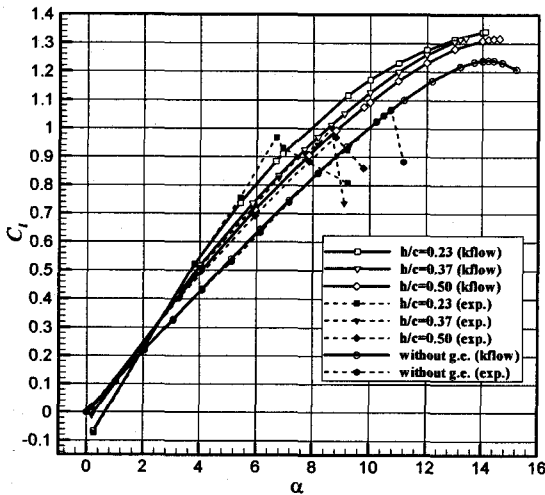


Fig. 4 Lift coefficients for each height and angle of attack

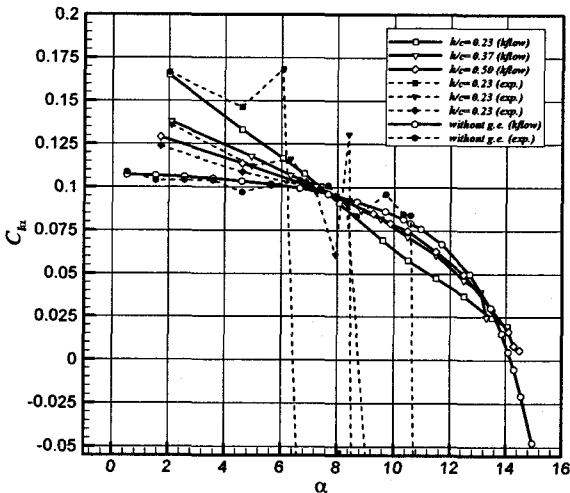


Fig. 5 Slope of lift coefficients for each height and angle of attack

6. 결과 및 분석

6.1 지면 효과가 없을 때

Fig. 4에서 Fig. 9까지는 지면이 없을 때와 지면이 있을 때 공력 계수이다. 먼저 지면 효과가 없을 때 RAE 101 익형의 공력 특성을 실험치[9]와 비교한 결과에 대해 간략히 설명하면 다음과 같다.

모든 공력 계수는 실속이 일어나 양력이 급속히 줄어드는 $\alpha = 11.20^\circ$ 에서 실험치와 수치 해석 결과의 차이가 발생한다. 이는 RAE 101 익형이 최대 두께 10%의 비교적 두께가 얇고 대칭이어서 고 받음각에서 급작스런 앞전 실속 (leading-edge stall)이 일어나기 때문이다. 수치 해석 결과는 그러한 실속이 $\alpha = 14^\circ$ 이상에서 일어나게 되는데 이는 fully turbulent flow 조건이나 익형 표면의 거칠기와 상관있는 것으로 유추된다. 또한, $dC_l/d\alpha = 2\pi \text{ rad.}^{-1} = 0.11 \text{ deg.}^{-1}$ 이고, 압력 중심과 공력 중심이 코드 길이의 25%로 위치가 거의 동일하다. 단, 받음각이 커지면 압력 중심에 비해 공력 중심이 상대적으로 익형의 앞전으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 비록 난류 유동을 고려하여 수치 해석하였으나 실험치와의 비교를 위하여 형상 항력 (pressure drag)만을 고려하였다. RAE 101은 받음각이 커지면 약간의 pitching-up 경향을 보인다.

양력 계수, 항력 계수, 압력 중심은 실험치와 잘 일치하는데 모멘트 계수 ($C_{mc/4}$)와 공력 중심은 다소 불규칙한 편이다. 이는 실험치가 C_p 에서 C_n (normal force coefficient)과 C_t (tangential force coefficient)를 계산하여 나머지 공력 계산을 유도하기 때문에 실험치 자체가 유효숫자 손실의 누적을 포함하기 때문인 것으로 유추된다.

6.2 지면 효과가 있을 때

지면 효과가 있을 때 중첩 격자의 검증 결과와 중첩 격자만으로 해석한 RAE 101 익형의 공력 해석 결과를 분석하기로 한다. 먼저, 지면 효과가 있을 때 Fig. 1과 같이 다중 블록 격자 기법을 사용하여 격자를 생성하면 익형의 앞전 아래 3개의 부격자가 만나는 영역에서 격자의 skewness 문제와 크기의 차이가 있다. 또한, 이미 알려진 바와 같이 각 받음각과 높이 조건에 대한 격자를 생성해야 하기 때문에 연구자의 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 한편, 다중 블록 격자 기법을 사용하면 Fig. 2와 같이 부격자가 작은 C형 격자일 경우 익형 후류의 격자 크기의 차이로 인한 해의 정확성이 문제시 될 수 있다. 그러나 Table. 1의 중첩 격자 기법과 다중 블록 격자 기법의 결과를 비교해 보면, 중첩 격자 기법의 해의 정확성을 신뢰할 수 있다. 또한, 생략했지만 압력 계수와 유선

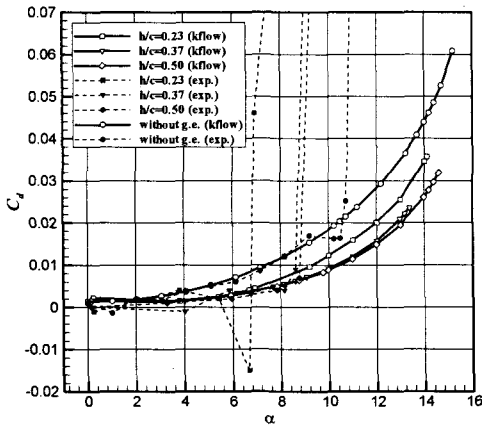


Fig. 6 Drag coefficients for each height and angle of attack

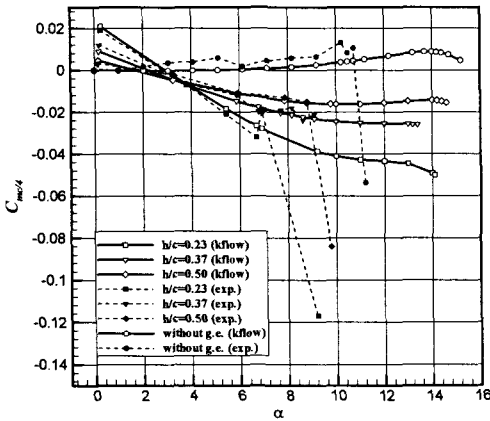


Fig. 7 Moment coefficients about the quarter chord point for each height and angle of attack

(streamline)의 비교 결과도 거의 동일하였다. 따라서 본 연구에서는 지면 효과를 받는 익형의 저속 정상 상태 해를 얻기 위하여 중첩 격자 기법만을 사용하였다.

다음은 중첩 격자 기법을 이용한 지면 효과를 받는 RAE 101 익형의 수치 해석 결과를 실험치와 비교하였다. Fig. 3은 $h/c=0.37$ 일 때 $\alpha=0.20^\circ \sim 8.17^\circ$ 범위에서의 압력 계수 곡선이다. 특히, 왼쪽 압력 계수 곡선에서는 윗면의 압력이 아랫면의 압력보다 높은 벤추리(venturi) 효과를 확인할 수 있는데, 이는 지면 효과가 있는 아랫면이 볼록한 형상을 한 익형이 받음각이 작거나 음일 때 나타나는 전형적인 현상이다. Fig. 3의 오른쪽 그림은 $\alpha=4.02^\circ, 6.79^\circ, 8.17^\circ$ 일 때 압력 계수로 실험치와 거의 비슷하다.

Fig. 4부터 Fig. 9까지는 $h/c=0.23, 0.37, 0.50$, 지면 효과가 없을 때 받음각(deg.)에 대한 양력 계수, 항력 계수, 모멘

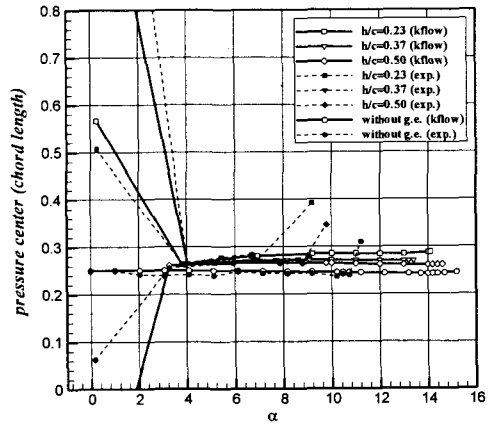


Fig. 8 Pressure centers for each height and angle of attack

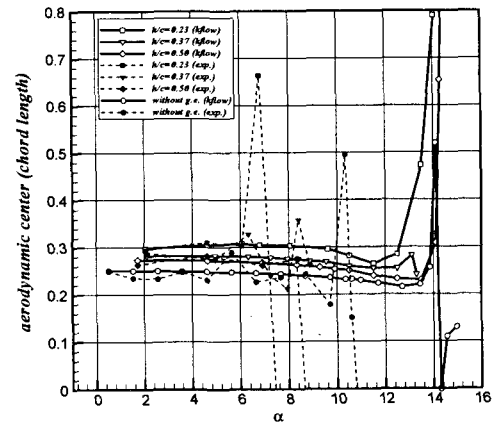


Fig. 9 Aerodynamic centers for each height and angle of attack

트 계수, 압력 중심, 공력 중심을 나타낸다. 공력 계수는 대체로 지면 효과의 영향이 적을수록 실험치에 근접해 가는데, 이는 지면에 가까울수록 ground board의 표면 상태와 유동 조건, 경계층 박리 등의 직접적 영향이 크기 때문으로 유추된다. 실험 결과[10]에 의하면 $h/c=0.23$ 이고 $\alpha=5.43^\circ$ 이상에서 ground board의 경계층 박리가 일어나므로 주의할 것을 명시하고 있다. 수치 해석 결과 $\alpha=9.21^\circ$ 부터 ground board의 경계층 박리가 시작된다. 양력 계수를 제외한 다른 공력 계수의 실험치가 불규칙하게 나타나는 것은 앞서 설명한 유효속자 손실의 누적으로 유추된다.

Fig. 4의 양력 계수를 살펴보면, $h/c=0.23, \alpha=0.25^\circ$ 인 경우와 $h/c=0.37, \alpha=0.20^\circ$ 일 때 음의 양력을 가지는 벤추리 효과를 확인할 수 있다. 또한 약 $\alpha=2^\circ$ 이상의 모든 받음각에서 지면 효과의 영향을 받고 있음을 확인할 수

있다. 더불어, 지면 효과가 없을 때와 마찬가지로 익형에서의 실속이 실험치보다 수치 해석 결과가 좀 더 지연되어 발생한다. 지면 효과가 없을 때 고 받음각에서 앞전 실속이 일어나는 것이 특징이라면, 지면 효과의 영향이 가장 큰 $h/c=0.23$ 의 조건에서는 $\alpha > 9.21^\circ$ 일 때 익형의 앞전 바로 아래 ground board 위와 익형의 뒷전 윗면에 bubble이 나타난다. 이와 같은 ground bubble은 $h/c=0.23$ 의 공력 계수에 영향을 주는데 이와 관련한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. Fig. 5의 양력 계수의 기울기를 살펴보면, 지면 효과가 없을 때는 저 받음각에서 약 0.11정도로 일정하다가 지면 효과가 커질수록 양력의 변화율이 커진다. 앞서 설명하였듯이 형상 압력만을 고려하기 때문에 양항비에 대한 설명을 명확히 할 수 없으나 Fig. 6의 항력 계수 결과만 두고 보면, $\alpha = 2^\circ$ 이상일 때 항력이 줄고, 지면에 가장 가까울 때가 다른 두 지면 조건보다 항력이 크다. Fig. 7의 $C_{mc/A}$ 에서는 지면에 근접해 갈수록, 받음각이 커질수록 pitching-down 경향과 변화율이 크게 나타난다. Fig. 8의 압력 중심과 Fig. 9의 공력 중심을 살펴보면 두 중심 모두 지면에 가까워질수록 익형의 뒷전 쪽으로 이동한다. 받음각이 커지면 약간 앞으로 이동하는데 실속 부근을 제외하고는 0.31을 벗어나지 않는다. 단, 압력 중심보다 공력 중심의 변화율과 지면 조건 사이의 차이가 큰 편이다.

7. 결론

본 연구에서는 중첩 격자 기법을 사용하여 RAE 101 익형이 지면 효과를 받을 때 공력 특성을 해석하였다. 중첩 격자 검증 결과 해의 정확성은 충분히 신뢰할 만 하였다. 지면 효과를 받지 않을 때 얇고 대칭인 익형의 전형적인 공력 특성을 보이다가, 지면 효과가 있을 때 높은 양력과 낮은 항력 특성을 보였다. 지면에 가까울수록, 받음각이 커질수록 pitching-down 경향이 있고 압력 및 공력 중심이 뒷전으로 약간 이동하였다. $h/c=0.23$ 의 고 받음각 조건에서 ground bubble이 발생하는데 이와 관련한 연구는 차후에 부가적으로 이루어질 것이다.

참고문헌

[1] 임예훈, 2000, "Navier-Stokes 방정식을 이용한 지면 효과 날개의 해석," 박사학위논문, 한국과학기술원, 대전.
 [2] Zhukov, V.I., 1997, *Features of Aerodynamics, Stability and Controllability of Ekranoplan*, TsAGI, Moscow.
 [3] Maskalik, A.I., Rozhdestvensky, K.V., Sinityn, D.N., 1998, "A View of the Present State of Research in Aero-

Hydrodynamics of Ekranoplans", RTO AVT Symposium on Fluid Dynamics Problems of Vehicles Operating near or in the Air-Sea Interface, Amsterdam, Netherland, 5-8 Oct.
 [4] Komissarov, S., 2002, *Russia's Ekranoplans*, Midland Publishing.
 [5] Lippisch, A., 1964, "Der Aerodynamische Bodeneffekt und die Entwicklung des Flugflügel (Airfoil-) Bootes," VDI Luftfahrttech.-Raumfahrttech, Vol.10, p.261-269.
 [6] Weiss, J.M. and Smith, W.A., 1995, "Preconditioning Applied to Variable and Constant Density Flows," AIAA J., Vol.33, No.11, p.2050-2057.
 [7] Thivet, F., 2002, "Lessons Learned from RANS Simulations of Shock-Wave/Boundary-Layer Interactions," AIAA Paper 2002-0583.
 [8] 김유진, 권장혁, 2005, "PC 클러스터를 위한 정렬 중첩 격자의 병렬처리," 한국전산유체공학회 추계학술대회 논문집, 창원
 [9] Brebner, G.G. and Bagley, J.A., 1952, "Pressure and Boundary-layer Measurements on a Two-dimensional Wing at Low Speed," A.R.C. R.&M. 2886.
 [10] Bagely, J.A., 1960, "The Pressure Distribution on Two-Dimensional Wings near the Ground," A.R.C. R.&M. 3238.
 [11] Park, S.H. and Kwon, J.H., 2004, "A Preconditioned HLLC Method for Flows at All Mach Numbers," AIAA Paper 2004-2709.
 [12] Wilcox, D.C., 1988, "Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models," AIAA J., Vol.26, No.11, p.1299-13130.
 [13] Park, S.H. and Kwon, J.H., 2004, "Implementation of k-w Turbulence Models in an Implicit Multigrid Method," AIAA J., Vol.42, No.7, p.1348-1357.
 [14] 성춘호, 권장혁, 최윤호, 이승수, 2001, "저마하수 예조건화 기법을 위한 다중격자 DADI 기법," 한국전산유체공학회 추계학술대회논문집.
 [15] Pulliam, T.H. and Chaussee, D.S., 1981, "A Diagonal Form of and Implicit Approximate-Factorization Algorithm," J. Comp. Phys., Vol.39, p.347-363.
 [16] Jespersen, D., Pulliam, T., and Burning, P., 1997, "Recent Enhancements to OVERFLOW," AIAA Paper 97-0644.
 [17] Steger, J.L., Dougherty, F.C., and Benek, J.A., 1985, "A Chimera Grid Scheme," In Advances in Grid Generation, ASME FED-Vol.5, New York, NY.