

< 논문 >

## 지면효과를 고려한 WIG선 익형의 공력특성 및 형상최적화

이주희\* · 김병삼\*\* · 박경우†

(2006년 5월 24일 접수, 2006년 9월 21일 심사완료)

### Aerodynamic Characteristics and Shape Optimization of Airfoils in WIG Craft Considered Ground Effect

Juhee Lee, Byeong-Sam Kim and Kyoungwoo Park

**Key Words :** WIG Craft(위그선), Ground Effect(지면효과), CFD(전산유체역학), Bezier Curve(Bezier 곡선), Static Height Stability(정안정성), Multi-objective Genetic Algorithm(다목적 유전 알고리즘), Pareto Set(파레토집합)

#### Abstract

Shape optimization of airfoil in WIG craft has been performed by considering the ground effect. The WIG craft should satisfy various aerodynamic characteristics such as lift, lift to drag ratio, and static height stability. However, they show a strong trade-off phenomenon so that it is difficult to satisfy aerodynamic properties simultaneously. Optimization is carried out through the multi-objective genetic algorithm. A multi-objective optimization means that each objective is considered separately instead of weighting. Due to the trade-off, pareto sets and non-dominated solutions can be obtained instead of the unique solution. NACA0015 airfoil is considered as a baseline model, shapes of airfoil are parameterized and rebuilt with four-Bezier curves. There are eighteen design variables and three objective functions. The range of design variables and their resolutions are two primary keys for the successful optimization. By two preliminary optimizations, the variation can be reduced effectively. After thirty evolutions, the non-dominated pareto individuals of twenty seven are obtained. Pareto sets are all the set of possible and excellent solution across the design space. At any selections of the pareto set, these are no better solutions in all design space.

#### 기호설명

$B_{ij}$  : Bezier 곡선의 블렌딩 함수

$C_d, C_l, C_p$  : 항력계수, 양력계수, 압력계수

$C_l / C_d$  : 양항비

$d_b, d_j$  : 적소 거리

$f_e^{off-line}$  : 오프라인(offline) 성능

$$f_e^{off-line}(s) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T f_e^*(t)$$

$f_e^{on-line}$  : 온라인(online)성능,

$$f_e^{on-line}(s) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T f_e(t)$$

$F(\mathbf{X})$  : 목적함수

$\vec{P}_i$  : Bezier 곡선의 제어점

$Sp_f$  : 선택압

$stability$  : 정안정성

$u_i$  : 속도 성분

$v$  : 설계 변수

#### 1. 서론

글로벌 경영과 세계 산업의 전반적 확대, 정보 산업의 발달에 힘입어 물류산업은 중요한 기간산업으로 자리하고 있다. Fig. 1은 대표적인 운송수단의 운송효율을 나타낸 Von Karman-Gabrielli 표<sup>(1)</sup>이

\* 회원, 씨디어덱코리아 사업부

\*\* 회원, 호서대학교 자동차공학과

† 책임저자, 회원, 호서대학교 기계공학과

Email : kpark@office.hoseo.ac.kr

Tel : (041)540-5804 FAX : (041)540-5808

다. 여기서 기술선(technology line)은 주어진 운송 하중에 대해 최소의 일로 얻을 수 있는 운송속도를 의미한다. 주로 도표의 왼편 상단에 위치한 선박은 저속이지만 많은 화물을 동시에 운송할 수 있으며, 항공기는 도표의 오른쪽 하단에 위치하여 적은 양의 화물을 고속으로 운송할 수 있음을 보여주고 있다. Von Karman-Gabrielli 표에서 흥미로운 사실은 기술선의 가운데 부분에 해당하는 운송수단이 없다는 것이다. 이 영역은 속도와 운송효율에 있어서 항공기와 선박의 중간정도에 해당되는데, 지면효과로 인해 항공기에 비해 상대적으로 많은 양력을 얻을 수 있는 WIG (wing-in ground effect)선이 이 영역에 해당하는 운송체제로 최근에 크게 각광을 받고 있다. WIG 선은 항공기와 같이 고정익으로 지면/해수면 위를 낮게 비행할 때 발생하는 양력의 증가와 유도항력(induced drag)의 감소를 이용해 100~500 km/h의 속도로 비행하는 선박이다.<sup>(2)</sup>

지금까지 익형이 지면에 근접하여 지면효과를 무시할 수 없는 경우의 공기역학적 특성들에 대한 실험 및 수치적 연구가 많이 수행되었다. Katsuhiko 등<sup>(3)</sup>은 풍동 내에 길이가 다른 두개의 판이 날개의 아래를 지나갈 때 지면에 의한 상호작용으로 발생하는 힘들의 변화를 실험적인 방법으로 측정하여, 경계요소법(boundary element method)을 이용한 수치적인 해와 서로 비교하여 경계요소법의 유용성을 주장하였다. 김양준 등<sup>(4)</sup>은 DHMTU 익형은 정안정성은 확보할 수 있으나 양력이 떨어지는 단점과 피칭모멘트를 보완할 수 있는 익형을 얻기 위하여 NURB 형상함수에 의해 익형을 구성하여 분산환경 기반의 반응표면법(response surface method)을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 이들에 의하면 개선된 익형은 DHMTU 익형에 비해 정안정성은 거의 같은 값을 가지나 양력은 약 5.6% 증가하였다고 하였다. 이때 얻은 익형은 피칭모멘트의 변화가 크기 때문에 2 점 설계(two point design)를 이용하여 양력과 정안정성을 유지할 수 있는 익형으로 최적화 하였다. 다목적 최적화는 국/내외적으로 많이 수행되지 않은 기법이다. 이주희 등<sup>(5)</sup>은 2 차원 익형에 대하여 GA(genetic algorithm)를 이용한 다목적 최적화를 수행하여 양력과 항력에 대하여 넓은 범위의 파레토(pareto) 최적해를 얻었다. 이들에 의하면 2 개의 설계공간 상에서 최적해는 최일선(pareto frontier) 상에 존재하였으며, 기준모델로 사용한 NACA0012에 비해 양력 및 양항비 관점에서 매우 우수한 익형의 형상을 얻었다.

캠버가 있는 일반적인 항공기의 익형은 지면에

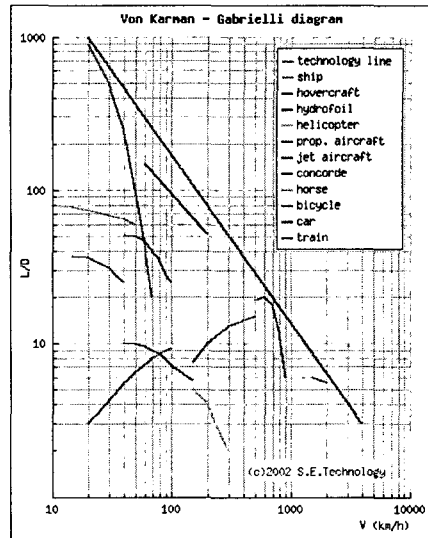


Fig. 1 Von Karman - Gabrielli diagram<sup>(1)</sup>

근접함에 따라 지면효과에 의한 충분한 양력을 얻을 수 있지만, 정안정성을 확보하는데 어려움이 있다. 이는 대형 꼬리날개와 같은 추가적인 구조물 또는 복잡한 자세제어를 필요로 하기 때문에 WIG 선 자체의 존립을 위협하는 기술적 난점이 되고 있다.

이 연구에서는 양력과 정안정성이라는 서로 강하게 상충(trade-off)되는 성능요소를 다목적 유전 알고리즘을 이용한 최적화 기법을 통하여 충분한 양력과 동시에 안정성을 가지는 익형을 얻고자 한다. 또한 서로 상반되는 목적함수들로 인해 최적해는 유일하게 정의 되지 않으므로, 지배되지 않는 전역 최적해, 즉 파레토 집합(pareto set)을 얻고자 한다. 이는 파레토 집합의 개체가 주어진 설계 영역내의 어떠한 값들보다 우수한 최적해이기 때문이다.

## 2. 최적설계

### 2.1 유전알고리즘(GA)

유전 알고리즘은 적자생존(survival of the fittest)과 생물학적 진화를 수치적으로 모사한 전역최적화(global optimization) 기법이다.<sup>(6,7)</sup> GA의 개체(individual)는 생물의 유전자처럼 설계변수만큼의 유전자들로 이루어진 염색체를 가지고 있다. 한 세대는 일정한 수의 개체로 이루어지며 각 개체는 염색체를 역 변환한 설계변수에 따라 목적함수를 계산하고, 그 개체가 속한 세대 내에서 적합함수를 이용해 상대적인 적합도(fitness)를 구하게 된다. 세대 내에서 상대적으로 높은 적합도를 가진 개체

는 높은 확률로 자신과 비슷한 유전자를 가진 자손을 낳을 수 있는 더 많은 기회를 가지게 된다. 만약 여러 세대에 걸쳐 높은 적합도를 가진 유전자가 있다면 세대 내에서 그와 비슷한 유전자 혹은 개체가 차지하는 비율이 점점 높아지게 된다. 진화가 거듭됨에 따라 우수한 개체가 많아지고 이전의 세대에 비해 평균적으로 적합도가 높아지게 된다. 일반적으로, 설계변수 주변의 도함수를 이용하는 최적화기법과 다르게 GA 는 전체 설계공간에 걸쳐 분포하는 여러 개의 개체를 이용함으로써 전역 최적화를 보장 받게 된다. 따라서 유전 알고리즘은 설계공간이 아주 복잡하거나, 다목적 함수 문제, 수치적 노이즈(noise)가 있는 경우, 또는 강건설계(robust design)에 적용이 용이한 최적설계 기법이다.

2.1.1 연산자(Operators)

**선택(selection)** : 선택은 유전 알고리즘의 가장 중요한 연산자이다. 이 연구에서는 다목적최적화 문제에 적합한 토너먼트방식을 사용하였으며, 선택 레벨만큼 토너먼트 방식의 경쟁을 통해 최종적으로 개체를 선택함으로써 선택압력(selection pressure)을 조정할 수 있도록 하였다. 선택은 다음과 같은 기본적인 과정을 거쳐 이루어 진다.

1. 두 개체 중 지배적인 개체가 존재하는가?
2. 두 개체 중 파레토 개체가 존재하는가?
3. 두 개체 모두 파레토 개체에 해당하는가?
4. 상대 비교하여 우수한 해를 선택한다.

이러한 선택의 과정은 기존의 파레토 우선 순위에 입각한 선택방법<sup>(7)</sup>이나 VEGA<sup>(8)</sup>와는 달리 근본적으로 비지배적(non-dominant)이라는 수학적 정의에 따라 이루어진다. 만약  $\bar{x}$ 가  $\bar{y}$ 에 대해서 지배적이라고 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{x} >_p \bar{y} \Leftrightarrow (\forall i F_i(\bar{x}) \geq F_i(\bar{y})) \cap (\exists j F_j(\bar{x}) > F_j(\bar{y})) \quad (1)$$

여기서  $F_i(\cdot), F_j(\cdot)$ 는 목적함수를 각각 나타낸다.

**적소(niche)** : 설계 공간상의 가까운 거리에 존재하는 개체들은 서로 비슷한 성향을 가지고 있기 때문에 좀 더 다양하고 넓은 영역을 탐색하기 위해서는 적소반경 내에 필요이상의 많은 개체가 존재하지 않도록 해야 한다. 적소거리는 설계 공간상의 거리 대신 다음과 같이 정의되는 염색체의 이진거리를 사용한다.

$$\frac{r_{ij}}{R} = \sum_{k=1}^L \left[ \frac{|d_i - d_j|}{R} \right]_k = \sum_{k=1}^L \left[ \frac{m \cdot \Delta x}{n \cdot \Delta x} \right]_k = \sum_{k=1}^L \left[ \frac{m}{n} \right]_k \quad (2)$$

여기서  $|d_i - d_j|_k$ 는 변수  $k$ 에 있어서의 개체  $i$ 에  $j$ 까지의 거리이며,  $m$ 은  $i$ 에서  $j$ 까지의 이진 거리를,  $n$ 은 적소반경의 이진 거리이다. 설계 공간상의 실제 거리를 사용하는 경우 설계변수의 절대값 차이로 인해 각 설계변수에 대하여 적소 반지름을 사용하여야 한다. 설계변수가 많아지는 경우 각각의 적소 반지름을 설정하는데 어려움이 있다. 따라서 이 연구에서는 이진거리를 사용함으로써 한 개의 이진거리로 적소를 일괄되게 적용할 수 있다. 다목적 유전알고리즘에 대한 자세한 내용은 이주희 등<sup>(9)</sup>의 참고문헌에 잘 나타나 있다.

3. 유동해석

3.1 지배방정식

WIG 선 익형 주위의 정상상태유동을 지배하는 보존방정식을 텐서형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{연속방정식} : \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j) = s_m \quad (3)$$

$$\text{운동방정식} : \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \quad (4)$$

여기서,  $u_i$ 는 절대속도를,  $\tilde{u}_j (= u_j - u_{cj})$ 는 움직이는 격자에 대한 상대속도이며,  $p = p_s - \rho_0 g_m x_m$ 는 피에조 압력을 나타낸다. 이때,  $p_s$ 는 정압,  $\rho_0$ 는 기준밀도,  $g_m$ 은 중력가속도, 그리고  $x_m$ 는  $\rho_0$ 가 정의된 기준위치로부터의 거리이다.  $\tau_{ij}, s_m, s_i$ 은 각각 응력 텐서, 질량추가 생성량, 운동량 추가 생성량을 의미하며, 난류점성 유동에 대한 응력텐서는 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'} \quad (5)$$

$$\text{여기서 } \overline{\rho u_i' u_j'} = -\mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

난류유동에 있어서  $u, p$ 와  $\tau_{ij}$ 를 포함한 모든 종속 변수들은 시간에 대해 앙상블 평균된 것으로,  $\overline{u_i' u_j'}$  항은 Reynold 응력을,  $\mu_t$ 는 난류점성계수를 나타낸다.  $\mu_t, \varepsilon, k$  구하기 위해서는 지배 방정식의 닫힌문제를 해결하여야 하는데, 이 연구에서는 표준  $k-\varepsilon$  난류모델을 이용한다. 이때 난류운동에너지( $k$ )와 이의 소산율( $\varepsilon$ ) 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \tilde{u}_j - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

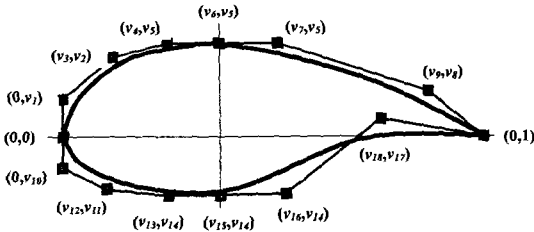


Fig. 2 Airfoil geometry parameterization

$$= \mu_t (P + P_B) - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \tilde{u}_j \varepsilon - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[ \mu_t P - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_B - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (9)$$

식 (8)의 우변 세 번째 항은 압축성에 기인한 생성항이다. 이 연구에서 사용한 표준  $k-\varepsilon$  표준모델의 상수값 및 함수는 참고문헌(9)에 잘 나타나 있다. 유동해석은 상용소프트웨어인 STAR-CD를 사용하였으며, 2차원 점성, 비압축성, 정상 유동으로 가정하였다.

3.2 Bezier 곡선을 이용한 익형

스플라인(spline)을 이용하거나 몇 개의 기본 익형을 중첩하여 사용하는 방법에 비해, Bezier 곡선을 이용하면 제어점의 급격한 변화에도 곡선의 변화는 완만하여 비 현실적인 익형을 만들어 내지 않는다. Bezier 곡선은 적은 설계변수의 수에 의해 형상을 표현할 수 있고, 곡선상의 점들은 고차 방정식을 사용하기 때문에 우수한 연속성을 유지할 수 있으며, 제어점의 변화에 따라 다양한 형태의 익형을 만들어 낼 수 있는 장점이 있다. 이 연구에서 이용한 Bezier 곡선의 방정식은 다음과 같다.

$$\bar{P}(t) = \sum_{i=0}^k \bar{P}_i B_{i,k}(t) \quad t \in [0,1] \quad (10)$$

$$B_{i,k}(t) = \frac{k!}{i!(k-i)!} t^i (1-t)^{k-i} \quad (11)$$

여기서  $\bar{P}_i$ 는 Bezier 곡선의 제어점을,  $B_{i,k}$ 는 블렌딩(blending)함수를 나타낸다. 이 연구에서는 Fig. 2에 도시한 바와 같이, 익형을 표현하기 위해 흡입면(suction side)에 2개, 압력면(pressure side)에 2개, 총 4개의 Bezier 곡선을 사용하였으며, 전연부

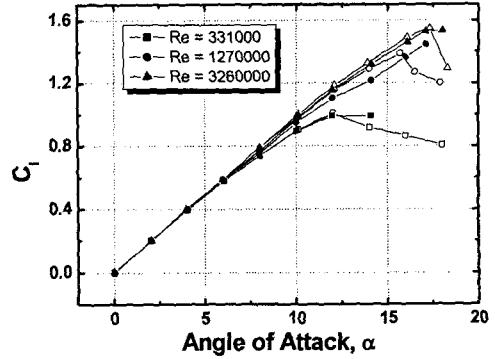


Fig. 3 Comparison of lift coefficients ( $C_l$ ) between experiments(hollow) and present study(filled)

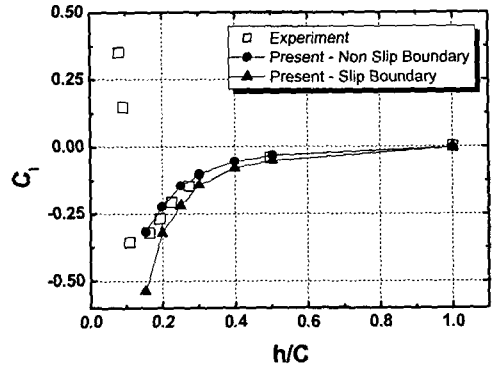


Fig. 4 Comparison of  $C_l$  between experiment<sup>(11)</sup> and this study according to height( $h/c$ ) at  $\alpha = 0$

(leading edge)는 4-차, 후연부(trailing edge)에 3-차 곡선으로 구성하였다. 전연부와 후연부를 연결하는 두 Bezier 곡선의  $C1$  연속성을 만족하기 위해 최대 두께의 두 제어점의  $y$  좌표 값( $v_3$ )을 일치시켰다. 한쪽 면마다 8개의 제어점이 존재하고 각 제어점 당 2개의 변수로 구성되어 고정점인 전연부와 후연부 그리고 최대 두께인 점을 고려해 매개변수의 수는 총 18개이다. 이 18개의 매개변수는 최적화의 설계변수(design variable)로 사용한다.

3.3 해석 모델의 타당성 검증

모델링의 타당성을 검증하기 위하여 두께만을 갖는 NACA0015 익형에 대하여 수치해석을 수행하였다. 이를 위해 Bezier 곡선으로 구성한 익형에 대한 해석결과를 비교하고, 지면효과익의 특성을 고찰해 보았다. 지면의 영향을 받지 않는 상태(OGE)인 익형에 대해 Reynolds 수 변화에 따른 양력계수를 실험치 Fig. 10(10)과 비교하여 Fig. 3에 나타

내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이, 모든 Reynolds 수의 경우 받음각( $\alpha$ , angle of attack)이  $0^\circ$  에서 박리가 발생하기(예를 들면,  $Re = 331,000$  인 경우 약  $12^\circ$ ) 전까지는 실험과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 Reynolds 수가 증가할수록 보다 큰 받음각에서 박리가 발생하며, 점성에 의한 박리가 발생하면 실속(stall)에 의해 양력이 급격히 감소하게 됨을 Fig. 3 은 잘 보여주고 있다. 또한  $Re = 1270000$  의 경우 받음각이  $16^\circ$  이상에서는 수렴된 해를 얻을 수 없었다. 일반적으로 NACA0015 는 지면으로 가까이 갈수록 최대 두께와 지면에 의한 가속/감속의 벤추리 효과로 인해 음의 양력을 발생하게 된다. 이는 대칭형 익형인 NACA0015 가 WIG 선의 날개로는 부적절하다는 것을 의미하는 것이다. 익형의 높이에 따른 양력 계수를 나타낸 Fig. 4에서 이러한 현상을 확인할 수 있다. 이때 실험( $\alpha=0$ )은 바닥면이 움직이지 않는 조건이다. 수치해석의 사각형(■)은 실험과 동일한 조건의 결과이며, 삼각형(▲)은 바닥면을 실제 비행상태와 같이 WIG 선의 이동 속도와 같은 속도로 이동시킨 경우이다. 지면 경계층의 영향이 적어지면서 압력면의 속도가 더욱 빨라지면서 음의 양력이 강해짐을 알 수 있다.

3.4 정안정성(stability)

지면효과를 받는 익형의 정안정성을 나타내는 Irodov<sup>(12)</sup>와 Staufienbiel<sup>(13)</sup>의 수식은 다음과 같다.

$$\frac{C_{m,\alpha}}{C_{l,\alpha}} - \frac{C_{m,h}}{C_{l,h}} \leq 0 \text{ or } C_{l,h} - \frac{C_{m,h}}{C_{m,\alpha}} C_{l,\alpha} \leq 0 \quad (12)$$

이때 하첨자  $h$ ,  $\alpha$  는 각각 높이와 받음각에 대한 도함수를 나타낸다. Irodo 의 수식은 받음각에 대한 공기역학적 중심보다 높이변화에 대한 공기역학적 중심이 더 앞쪽에 있어야 안정함을 의미한다. 근본적으로 같은 수식이며 최적화를 위한 목적함수로는 Staufienbiel 의 수식을 사용하였다.

Fig. 5는 높이( $h/c$ ) 및 받음각에 따른 NACA 0015 의 정안정성을 나타낸 그림이다. 높이가 감소함에 따라 정안정성값이 급격히 증가(정안정성 감소)하는데, 이는 높이에 따른 양력의 급격한 감소와 모멘트의 급격한 증가 때문이다. 또 받음각이 증가함에 따라 양력은 증가하고 모멘트는 감소하므로 익형이 지면으로 접근 함에 따라 급격히 안정성을 상실하게 된다. 이러한 현상들은 WIG 익형이 가져야 하는 근본적인 특성과는 많은 차이가 있다.

4. 결과 및 고찰

유전알고리즘의 가장 큰 장점은 세대 단위로

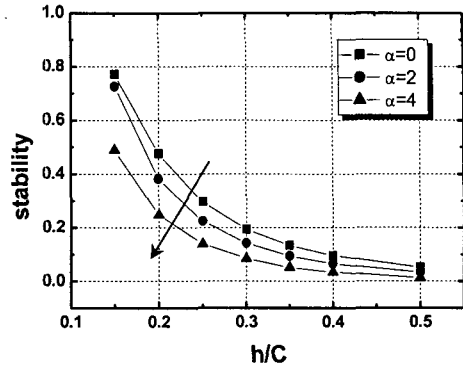


Fig. 5 Static height stability of NACA0015 according to height ( $h/c$ ) at  $\alpha = 0$

여러 개의 가능성 있는 해를 동시에 진화시킨다는 것이다. 일반적으로 다목적함수의 최적해는 해가 서로 선형적으로 종속되어 있는 경우를 제외하고 유일하게 결정되지 않기 때문에, 크게 지배되는 (dominated)해와 지배되지 않는(non-dominated) 파레토 해로 나눌 수 있다.

WIG 선 익형의 최적화를 위한 설계문제는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

Find  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}^T$  (13)

to minimize  $F_1(X) = C_d / C_l$  (14)

to minimize  $F_2(X) = C_l$  (15)

to minimize  $F_3(X) = C_{l,h} - \frac{C_{m,h}}{C_{m,\alpha}} C_{l,\alpha}$  (16)

$$X_i^L \leq X_i \leq X_i^U \text{ for } i=1,18 \quad (17)$$

여기서  $X$ 는 Fig. 2에서 설명한 설계변수를,  $F(X)$ 는 목적함수를 각각 나타낸 것으로, WIG 익형에서 가장 중요한 양항비( $C_d/C_l$ )와 양력( $C_l$ ), 그리고 식 (12)에서 정의한 정안정성 등 3 가지 물리량을 목적함수로 설정하였다. 제약조건은 없으며 단지 설계변수의 상한과 하한만을 가지고 있다. 다목적 최적화를 수행하였으므로 목적함수를 가중하거나 정규화 할 필요가 없다. WIG 선이 지면효과를 받으며 정상운행 상태( $h/c=0.25, \alpha=2$ )에 대하여 최적화를 수행하였다. 최적설계를 위한 설계변수 및 이들의 상/하한값들을 Table 1에 나타내었으며, Table 2는 사용한 유전알고리즘의 기본적인 변수들이다. 세대내의 개체수는 25 개를 사용하였으며, 세대 단위 GA를 적용하고 수렴성 향상을 위해

Table 1 Upper and lower limits of design variables

$X_i$	$X_i^L$	$X_i^U$	$X_i$	$X_i^L$	$X_i^U$
$v_1$	0.010	0.040	$v_6$	0.220	0.400
$v_2$	0.050	0.070	$v_7$	0.550	0.750
$v_3$	0.050	0.065	$v_8$	0.010	0.0250
$v_4$	0.080	0.200	$v_9$	0.800	0.950
$v_5$	0.075	0.100			
$v_{10}$	-0.040	-0.020	$v_{15}$	0.250	0.350
$v_{11}$	-0.070	-0.035	$v_{16}$	0.370	0.550
$v_{12}$	0.035	0.050	$v_{17}$	-0.010	-0.003
$v_{13}$	0.100	0.200	$v_{18}$	0.700	0.850
$v_{14}$	-0.065	-0.020			

Table 2 Parameters for genetic algorithm

	Value
Population	30
Generation	30
Cross over rate	0.8
Mutation rate	0.5%
Tournament level	2
Niche	1

선택압은 2 로 하였다. 전역탐색을 위한 채굴 (exploitation)과 탐험(exploration)의 정도를 유지하기 위하여 0.5%의 돌연변이율을 적용하였다. 또한 새롭게 생성된 자식 개체가 유전적으로 일치하는 일란성 쌍생이 존재하는 경우 이를 제거하고 새롭게 개체를 생성하도록 하였다.

WIG 선 익형의 최적형상을 도출하기 위한 기본 모델(baseline model)로 NACA0015 를 사용하였다. 설계변수의 범위와 해상도는 최적화하고자 하는 설계 공간의 크기를 결정하게 됨으로 성공적인 최적화에 중요한 요소들이다. 설계변수가 많아짐에 따라 설계공간이 기하 급수적으로 커지게 된다. 이러한 문제를 최소화 하기 위해 이 연구에서는 총 3 회의 최적화를 수행하였다. 즉, 초기 2 회의 예비 최적화 단계로, 이 때 얻은 결과를 이용하여 최종적인 최적해를 구하였다. 첫 번째 예비 최적화 단계에서는 설계공간에 대한 충분한 정보를 가지지 않으므로 기본모델인 NACA0015 를 기준으로 2 차원 공간에서 서로 간섭이 일어나지 않는 임의의 범위 값을 사용하였다. 그리고 최적화에 사용되는 시간을 최소화 하기 위하여 각 변수들을 5bit 의 정도(resolution)를 가지도록 하였으며(설계공간은  $64^{18}$ ), 20 세대 진화하도록 하였다. 설계공간은 두 번째 예비 최적화에서도 같은 정밀도를 사용하여 수행하였다. 각 최적화에서 얻은 파레토

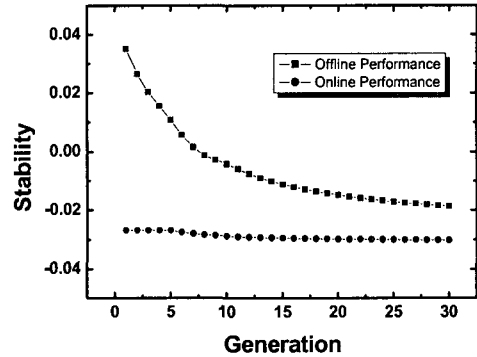


Fig. 6 On and off-line performance of stability

집합을 조사한 후 이 값들의 범위가 초기의 주어진 범위의 한쪽 극한값에 집중 되는 경우 설계의 범위를 늘리고 또 임의의 값에 집중되어 있다면 이 변수의 범위를 줄여 정밀도를 높이도록 하였다. Table 2 는 이러한 예비 최적화를 통하여 얻은 파레토를 기준으로 설정되었으며, 초기의 임의의 공간에서는 존재하지 않던 정안정성을 만족하는 해들을 얻을 수 있었다. 이때 해상도는 9bit 를 사용하였으며 설계공간은  $512^{18}$ 가 된다.

Fig. 6은 목적함수에 대하여 Dejong<sup>(14)</sup>이 제시한 on-offline 최적화 경로를 나타낸 것으로, 사각형(■)은 offline 최적화 경로를, 원형(●)은 online 최적화 경로이다. 자식세대로 진화됨에 따라 점진적으로 수렴하고 있다. 다목적 최적화를 수행하면 최적해는 유일하게 정의 되지 않으며 각 목적함수에 대하여 상호 우월성을 가릴 수 없는 해들의 집합인 파레토 집합을 얻게 된다. On-offline 수렴성을 나타내는 Fig. 6에서 보듯이 정안정성은 세대에 따라 비교적 빠르게 최적화되어 감을 알 수 있다.

Fig. 7 ~ Fig. 9 는 3 차원 설계공간을 2 차원 공간에 사상한 개체와 최적해들을 보여준다. 실제 개체들은 넓은 공간에 걸쳐 펼쳐져 있으며 그림에 나타낸 것은 파레토 근방의 개체만을 나타낸 것이다. 속이 빈 사각형(□)은 파레토 집합을 나타내며 속이 찬 사각형(■)는 지배되어지는 개체들이다. 각 그림마다 사각형안의 숫자는 임의로 붙여진 파레토의 번호이다. 근본적으로 양력과 양항비는 선형적인 관계를 가지고 있는데 이러한 관계는 Fig. 7에 잘 나타나고 있다. 최적화는 양력과 양항비 모두를 최대화시켜야 하기 때문에 오른쪽 상단에 최적값들이 존재하게 된다. 그러나 파레토 최적해들은 그 외의 영역에서도 상당히 발견되고 있다. 이는 3 차원 최적화 공간을 2 차원에 투영하였기 때문에 발생하는 현상이다. 최전방의 해보다 약간

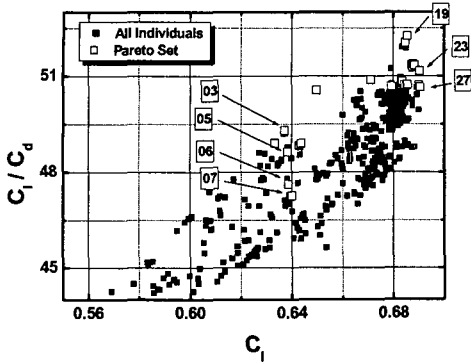


Fig. 7 Pareto set and dominated individuals with respect to  $C_l$  and  $C_l/C_d$

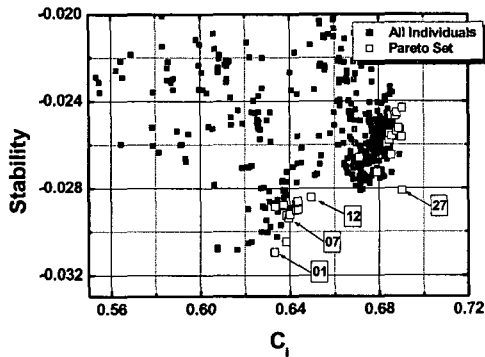


Fig. 8 Pareto set and dominated individuals with respect to *Stability* and  $C_l$

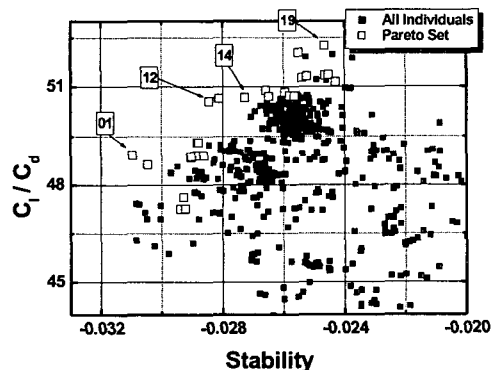


Fig. 9 Pareto set and dominated individuals with respect to *Stability* and  $C_l/C_d$

왼쪽 하단에 존재하는 해들의 집합은 정안정성과 밀접한 관계를 가지고 있는 해들이다.

Fig. 8은 양력과 정안정성에 대한 파레토 최적해들을 보여주고 있다. 이 연구는 정안정성을 최소

화하고 양력을 최대화하는 문제이므로 그림의 오른쪽 하단이 파레토 집합에 해당한다. 양력과 정안정성은 일반적으로 상충되는 성향이 강하기 때문에 최적화의 공간이 비교적 좁다. 기본모델(NACA0015)의 경우 최적화를 하려는 조건 ( $h/C=0.25, \alpha=2$ )에서 양력은 -0.134844, 안정성은 0.224476이다. 이들 값은 현재 최적화 범위 밖에 존재하기 때문에 함께 표시하지는 않았다. 2번의 초기 최적화를 수행함으로 최적의 해와 관계가 적은 영역은 미리 효과적으로 제거할 수 있었음을 알 수 있다.

정안정성에 대한 양항비를 나타낸 Fig. 9의 경우 Fig. 8와 비슷하게 양력과 안정성이라는 지향성에 따라 크게 2개의 무리를 이루는 것을 볼 수 있다. 양항비는 최적치의 경우 45~55의 범주를 나타내고 있다. 그림의 오른쪽 아래에 넓게 펼쳐진 영역은 모두 지배되어지는 해들로 비교적 초기 세대에서 생성된 개체들이다. 파레토 집합들도 자세히 보게 되면 상대적으로 오른쪽 상단을 차지하는 개체들과 왼쪽 하단을 차지하는 개체들로 나누어진다. 이들 개체는 특성상 양항력비가 우세한 해와 안정성이 높은 해들로 나뉘어진다. 양력 혹은 양항력비와 안정성은 강하게 반비례의 관계에 있으므로 양항비의 증가는 안정성의 희생이 있어야 한다.

Fig. 10 ~ Fig. 13은 파레토집합의 2차원 사상면상에 존재하는 중요한 몇 가지 파레토 집합들에 대한 익형 형상과 압력계수를 나타낸 것이다. 대부분의 파레토 해는 지향하는 특성에 따라 날개의 전연의 형상과 두께가 다르게 나타남을 알 수 있다. 반면에 압력면의 뒷전부분은 거의 변화가 없이 지면과 수평을 이루어 압력의 변화 없이 일정하게 빠져 나간다.

Fig. 10은 Fig. 7의 양력과 양항비에 대한 파레토 집합 중 일부의 익형과 압력분포를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 설명 하였듯이 양력과 양항비는 서로 간의 선형성으로 인해 파레토 집합은 아주 좁은 영역에 걸쳐 존재한다. 따라서 익형의 형상과 압력의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 11은 파레토 집합 중 양력의 값은 거의 같으면서 양항비가 다른 최적해들로 항력에 의한 효과들을 볼 수 있다. Fig. 11에서 보듯이 압력면의 형상 변화는 거의 없으나 흡입면의 전연 형상의 변화를 볼 수 있다. 유동박리의 발생이 미미한 2차원 익형에 대한 항력은 주로 마찰력 (skin friction)에 의해 발생하게 된다. 익형의 두께는 비교적 두꺼우며 그 위치는 pareto#07로 갈수록 앞쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이로 인해 앞

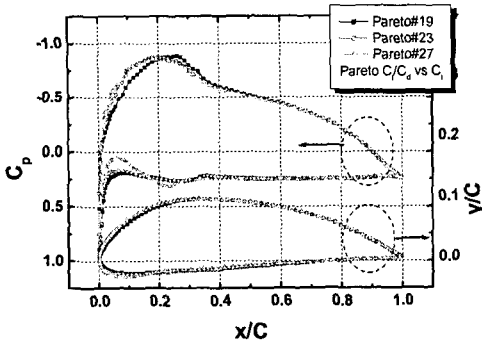


Fig. 10 Airfoil profiles and pressure distributions of Pareto set from  $C_l$  and  $C_l/C_d$

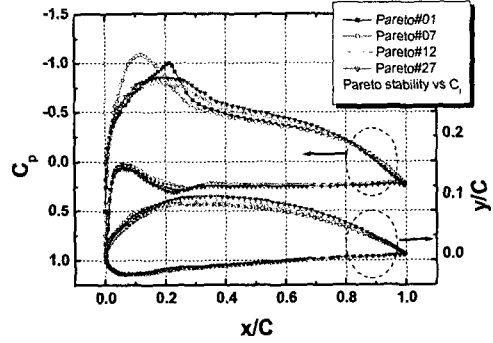


Fig. 12 Airfoil profiles and pressure distributions of Pareto set from *Stability* and  $C_l$

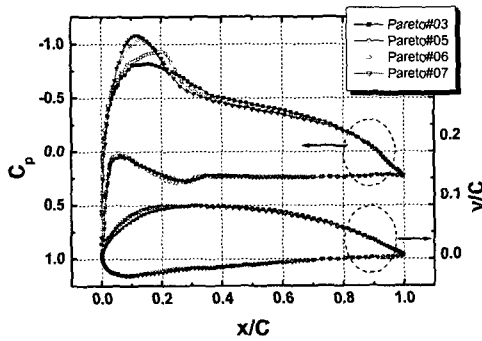


Fig. 11 Airfoil profiles and pressure distributions of Pareto set from  $C_l/C_d$  with constant  $C_l$

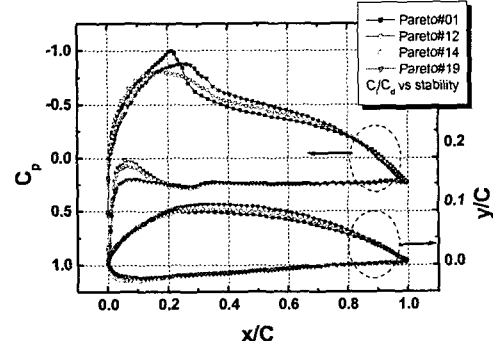


Fig. 13 Airfoil profiles and pressure distributions of Pareto set from *Stability* and  $C_l/C_d$

전의 형상은 급격하게 변화하는 것이며, 최대압력이 증가한다. 또한 양력은 미세하게 상승하지만 동압의 급격한 증가에 의한 마찰력의 증가로 양항비가 나빠지게 된다.

Fig. 12는 양력과 정안정성에 대한 파레토 집합에 대한 익형의 형상과 압력을 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 익형의 전연과 두께에 있어 뚜렷한 차이를 볼 수 있다. 정안정성 우선의 익형을 설계할 경우, 흡입면의 두께는 얇으며 그 위치도 비교적 앞쪽에 존재하게 된다. 양항비에 대해서는 반대의 경향을 나타내고 있다. 또 흡입면의 압력이 날개 전체의 압력변화에 영향을 미쳐 최대압력을 감소시키고, 최대압력이 발생하는 지점을 지나서 이후 익형의 변화율을 적게 만든다. 따라서, 익형의 중반 이후에도 비교적 큰 압력을 유지함으로써 양력을 증대시키고 마찰에 의한 항력을 최소화함으로써 양항비를 개선하는 효과를 가져오는 것이다.

Fig. 13는 양항비와 정안정성에 대한 파레토집합 중 일부를 나타내었다. Fig. 12와 비슷한 양상을

보이며 압력의 변화는 비교적 유순하여 최고점의 크기는 줄이고 전체적인 압력을 크게 함으로 높은 양력을 얻고 있다. 또 양항비 우선의 파레토들은 상대적으로 서로 모순되어지는 정안정성은 낮아짐을 알 수 있다. 각 파레토에 대한 익형을 분석한 결과(Fig. 10 ~ Fig. 13)에서 알 수 있듯이, 익형의 공기역학적 특성에 가장 많은 영향을 미치는 부분은 전연과 날개의 두께 그리고 전연에서 최상두께를 갖는 부위에 이어지는 형상임을 알 수 있다. 이 두 부위는 공기 역학적으로도 압력계수에 직접적으로 영향을 미칠 뿐 아니라 압력면의 압전부위는 지면과의 사이로 공기를 불어 넣는 역할을 하는 중요한 부분이다.

이상의 결과들을 변수들과 목적함수의 관계에 대한 상관도 분석을 통하여 확인할 수 있는데, 이를 위하여 Table 3에 각 변수와 파레토집합에 있어 목적함수와의 관계 중 연관성이 깊은 변수들만을 나타내었다. 파레토와 익형의 형상을 나타내는 최적화변수 사이에 95% 신뢰구간에서 상관관계를 분석한 결과 모든 목적함수에 대하여 변수  $v5$ ,  $v6$  그리고  $v11$ 이 정비례관계가 있음을 알 수 있다.



Table 3 Correlation and P-value between variables and objectives

Variable No.		v4	v5	v6	v11
C <sub>l</sub>	Correlation		0.991	0.464	0.692
	P-value		0.000	0.000	0.000
Stab.	Correlation		0.897	0.65	0.892
	P-value		0.000	0.000	0.000
C <sub>l</sub> /C <sub>d</sub>	Correlation	0.758	0.88	0.752	0.759
	P-value	0.000	0.000	0.000	0.000

그리고 양항비에 대해서는 이들 변수 이외에 v4 변수가 밀접한 관계를 가지고 있다. 여기서, v5 은 익형의 최대두께를 나타내는 변수이며, v6 은 최대 두께의 위치를, 그리고 v11 은 압력면의 전연의 두께를 나타내는 변수이다. 이러한 정비례 관계로부터, 이들 변수의 값이 증가하게 되면 양력과 양항비 관점에서는 유리하나 정안정성은 나빠지게 된다. 반대로 감소하는 경우는 정안정성은 좋아지나 양력과 양항비에는 악영향을 미친다. 이러한 사실로부터 양항력, 양력과 정안정성은 동일한 변수에 대하여 서로 반대의 경향을 가지므로 결과적으로 목적함수들이 서로 강하게 상충(trade-off)됨을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

이 연구에서는 다목적 유전알고리즘과 전산유체 역학을 이용하여 WIG 선 익형의 형상최적화를 수행하였다. 이를 위하여 NACA0015 익형을 기본모델로 삼아 WIG 선이 세로 정안정성을 유지하면서 충분한 양력을 얻을 수 있는 익형의 최적설계 값을 얻고자 하였으며, 설계변수는 Bezier-곡선의 18 개의 제어점을 선택하였다. 이 때 성능함수인 목적함수로는 양력, 양항비, 정안정성 등을 선택하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 먼저, NACA0015 익형에 대한 공력특성으로부터 대칭형 두께를 가지는 익형의 경우 지면으로 근접함에 따라 음(-)의 양력이 발생하여 WIG 선의 익형으로는 부적절함을 알 수 있었다. 목적함수간의 서로 상충되는(trade-off) 관계는 다목적 유전 알고리즘을 사용함으로써 목적함수 공간에 대한 가중이나 표준화 과정 없이 서로 지배되어 지지 않는 파레토 최적해를 얻을 수 있었다. 이때 얻은 파레토 집합은 모두 안정성이 -0.024 보다 작아 정안정성 조건을 만족하기 때문에 양력과 항력의 조건에 따라 최적설계 변수값을 선택할 수 있었다. 또한 2 번의

예비 최적화를 수행함으로써 해의 공간을 줄이고 정밀도를 높일 수 있었다.

## 후기

이 논문은 2005 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-003-D00007).

## 참고문헌

- (1) <http://www.se-technology.com/wig/index.php>
- (2) <http://www.imo.org/home.asp>
- (3) Katsuhiko Kikuchi, Fuminori Motoe and Mitsunori Yanagizawa, 1997, "Numerical Simulation of the Ground Effect Using the Boundary Element Method," *Int. J. For Numerical Methods in Fluids*, Vol. 25, pp. 1043~1056.
- (4) Yang-Joon Kim and Chang-Yeoul Joh, 2005, "Aerodynamic Design Optimization of Airfoils for WIG Craft Using Response Surface Method," *J. of KASA(Korean)*, Vol. 33, No. 5, pp. 18~27.
- (5) Juhee Lee, Sanghwan Lee and Kyoungwoo Park, 2005, "Global Shape Optimization of Airfoil Using Multi-objective Genetic Algorithm," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 10, pp. 1163~1171.
- (6) Poloni, A. C., Giurgevich, A., Onesti, L. and Pediroda, V., 1999, "Hybridization of a Multi-Objective Genetic Algorithm, a Neural Network and a Classical Optimizer for a Complex Design Problem in Fluid Dynamics," Dipartimento di Energetica Università di Trieste, Italy.
- (7) Goldberg, D., 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addition-Wesley.
- (8) Schaffer, J.D., Caruana, R.A., Eshelman L.J. and Das R., 1988, "A Study of Control Parameters Affecting Online Performance of Genetic Algorithms for Function Optimization," *Proc. 3rd Int. Conf. On Genetic Algorithms*.
- (9) STAR-CD v3.15 Methodology, 2001, Computational Dynamics, Co., London. U. K.
- (10) Eastman N. Jacobs and Albert Sherman, 1937, *Airfoil Section Characteristics as Affected by Variation of the Reynolds Number*, NACA TR-586.
- (11) Ranzbach, R. and Barlow, J. B., Dec., 1994, "Two-Dimensional Airfoil in Ground Effect, An Experimental and Computational Study," *GLM Wind Tunnel*, Vol. 1, Issue 287, pp. 241~250.
- (12) Irodov, R. D., 1970, "Criteria of Logitudinal Stability of Ekranoplan," *Ucheniye Zapiski TSAGI*, Vol. 1, No. 4.
- (13) Staufenbiel, R. W., 1987, "On the Design of Stable Ram Wing Vehicles," *The Royal Aeronautical Society Symposium Proc.*, pp. 110~136.
- (14) Dejong, K. A., 1975, *An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems*, Doctoral Thesis, Department of Computer and Communication Sciences, University of Michigan, Ann Arbor.