

지면효과를 받는 3 차원 WIG 선의 익형 형상 최적화

이주희[†] · 유근열* · 박경우**

Aerodynamic Optimization of 3 Dimensional Wing-In-Ground Airfoils Using Multi-Objective Genetic Algorithm

Juhee Lee, Keun-yeal You and Kyoungwoo Park

Key Words : 3 Dimensional Geometry(3 차원 형상), Genetic Algorithm(유전알고리즘), WIG Craft(위그선), Pareto set(파레토집합), Global Optimization(전역최적화), Ground Effect (지면효과), Multi-objective objective(다목적 최적화), Bezier curve(Bezier 곡선)

Abstract

Shape optimization of the 3-dimensional WIG airfoil with 3.0-aspect ratio has been performed by using the multi-objective genetic algorithm. The WIG ship effectively floating above the surface by the ram effect and the virtual additional aspect ratio by a ground is one of next-generation and cost-effective transportations. Unlike the airplane flying out of the ground effect, a WIG ship has possibility to capsize because of unsatisfying the static stability. The WIG ship should satisfy aerodynamic properties as well as a static stability. They tend to strong contradict and it is difficult to satisfy aerodynamic properties and static stability simultaneously. It is inevitable that lift force has to scarify to obtain a static stability. Multi-objective optimization technique that the individual objectives are considered separately instead of weighting can overcome the conflict. Due to handling individual objectives, the optimum cannot be unique but a set of non-dominated potential solutions: pareto optimum. There are three objectives; lift coefficient, lift-to-drag ratio and static stability. After a few evolutions, the non-dominated pareto individuals can be 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		v	: 디자인 변수
		$stability$: 정안정성
C_l	: 양력계수		
C_p	: 압력계수		
d_b, d_j	: 적소 거리		
Fit	: 적합도		
$F(\mathbf{X})$: 목적함수		
\bar{P}_i	: Bezier 곡선의 제어점		
Sp_f	: 선택압		
u_i	: 속도 성분		

1. 서론

정보산업의 발달로 인해 다양한 산업들이 지역적인 경계를 넘어서 세계각지로 분산되었다. 이러한 지역적으로 분산된 산업을 연결하는 역할을 하는 것이 물류산업이다. 더 많은량의 화물을 더 빠른 시간에 운송하고자 하는 요구는 점점 더 높아지고 있으며 이러한 요구를 충족할 수 있는 새로운 형태의 운송수단이 절실히 필요해졌다. Fig. 1의 Von Karman-Gabrielli 도표는 대표적인 운송수단의 운송효율을 보여준다. 그 중 기술선(technology line)은 운송수단의 궁극적인 효율들은 나타낸다.

[†] 회원, 호서대학교, 메카트로닉스공학과
E-mail : juheele@hoseo.edu
TEL : (041)540-9656 FAX : (041)540-5396

* 호서대학교 일반대학원, 메카트로닉스공학과

** 호서대학교 기계공학과

이중 선박과 같은 해상운송수단은 도표의 왼편 상단에 위치하여 저속이며 많은 화물을 한꺼번에 운송할 수 있다. 항공운송수단의 경우는 도표의 오른쪽 하단에 위치하며 적은 양의 화물을 고속으로 운송할 수 있음을 보여준다. 기술선의 가운데 영역은 속도와 운송효율에 있어서 항공기와 선박의 중간정도에 해당한다. 이 영역에 들어 갈 수 있는 고효율운송체의 한가지는 지면효과로 인해 항공기에 비해 상대적으로 높은 양력을 얻을 수 있는 WIG(Wing-in ground effect)선 이다. WIG선은 고정익에 의해 수면위를 나르기 때문에 파도에 의한 조파저항이 없고 비행기와 같이 100~500km/로 고속 운항⁽¹⁾이 가능하다. 또 지면효과로 인해 적은 추력으로도 충분한 양력이 발생한다. 또 높은 양항비는 WIG선의 운항에 드는 비용을 줄일 수 있는 장점이 된다. 따라서 현재의 항공기와 선박에 의존하는 물류산업이 요구하는 경제성과 고속성을 동시에 만족할 수 있는 유일한 대안이 WIG선의 개발이라 할 수 있다. 그러나 WIG선은 지면과의 상호 작용으로 쉽게 뒤집히는 안정성(static stability) 문제를 가지고 있다.

조창열 등⁽²⁾은 수치해석적인 방법을 이용하여 지면효과를 받는 익형 주변의 압력변화, 항력, 안정성 등을 고찰하였다. 3 차원 익형에 관하여 익단 와류강도의 증가현상, 유효스팬의 증가, 익단와류의 바깥 흐름 현상에 관하여 고찰하였다. 특히 바깥 흐름의 경우 끝단와의 증가와 관계없이 자유와류가 인접한 이미지 지면 와류에 의해 바깥으로 흐르는 현상이라 하였다. 또 점성 Navier-Stokes와 비점성 Euler방정식의 해를 비교한 결과 지면효과에 의한 유동은 주로 비점성 유동에 의한 현상임을 밝혔다. 특히 안정성에 있어 DHMTU 8-30 이 기존의 항공기용 익형인 NACA4415 에 비해 지면에 의한 정안정성을 확보할 수 있음을 보였다. 이 주희등⁽³⁾은 양력, 양항비와 정안정성 세 가지 서로 상충(trade-off)되는 WIG선에 있어 중요한 요소를 다목적 유전알고리즘을 이용한 최적화 기법을 통하여 충분한 양력과 동시에 안정성을 가지는 익형을 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 저자의 이전 2 차원 지면효과⁽³⁾의 연구에 이어 3 차원 익형에 대하여 양력, 양항비, 정안정성을 고려한 전역최적화를 수행하였다. 유한한 길이의 스패(span)를 가짐으로 디자인 변수는 2 차원 형상의 익형을 결정하는 변수에 3 차원 공간상에 날개의 형태를 결정하는 날개의 후퇴각(angle of sweep back), 코드비(chord ratio)를 추가하였다. 정안정성의 문제는 2 차원, 3 차원 익형

에 동일하게 나타나는 현상이다. 이는 대형 꼬리 날개와 같은 추가적인 구조물을 필요로 하거나 복잡한 자세제어를 필요로 하게 됨으로 WIG선 자체의 존립을 위협하는 기술적 난점이 되고 있다. 서로 상반되는 목적함수들로 인해 최적해는 유일하게 정의 되지 않으며, 지배되지 않는 전역 최적해, 즉 파레토 집합(pareto set)을 얻을 수 있었다. 파레토 집합의 개체는 주어진 설계영역내의 어떠한 값들보다 우수한 해가 된다.

2. 최적설계

2.1 유전알고리즘(GA)

유전 알고리즘은 적자생존(survival of the fittest)과 생물학적 진화를 수치적으로 모사한 전역최적화(global optimization) 기법이다⁽⁴⁾⁽⁵⁾. GA의 개체(individual)는 생물의 유전자처럼 설계변수만큼의 유전자들로 이루어진 염색체를 가지고 있다. 세대 내에서 상대적으로 높은 적합도를 가진 개체는 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.

2.1.1 연산자(Operators)

선택은 유전 알고리즘의 가장 중요한 연산자이다. 이 연구에서는 다목적최적화 문제에 적합한 토너먼트방식을 사용하였으며, 선택의 레벨만큼 토너먼트 방식의 경쟁을 통해 개체가 최종적으로 선택되게 함으로 선택압력(selection pressure)을 조정할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 사용한 선택의 과정은 기존의 VEGA⁽⁶⁾나 파레토 우선 순위⁽⁶⁾에 입각한 선택방법과 다르게 근본적으로 비지배적(non-dominant)이라는 수학적 정의에 따라 이루어진다. 지배적이라는 것은 아래와 같다.

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

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

교배에 있어 자름선의 수는 유전자내에 존재하는 패턴인 스키마(schema)의 생존과 밀접한 관계를 가지고 있다. 초기의 길이가 짧은 스키마에서 점점 진화를 거듭함에 따라 길이가 길고 적응도가

높은 스키마로 변하게 된다. 이러한 현상을 빌딩 블록가설(building block hypothesis)⁽⁷⁾이라고 한다. 그리고 스키마의 길이가 길수록 홀수 보다는 짝수의 자름선을 사용한 교배가 스키마의 생존이라는 측면에서 유리하다⁽⁸⁾. 따라서 이 연구에서는 2 점 교배를 사용하고, 옵션으로 1 점 교배도 가능토록 하였다. 디자인 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 사용하였다.

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

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 적소반지름의 이진 거리이다. 설계 공간상의 실제 거리를 사용하는 경우 설계변수의 절대값의 차이로 인해 각 설계변수에 대하여 적소 반지름을 사용하여야 한다. 설계변수가 많아지는 경우 각각의 적소 반지름을 설정하는데 어려움이 있다. 이 논문에서는 이진거리를 사용함으로써 한 개의 이진거리로 적소거리를 일관되게 적용할 수 있다.

2.2 Bezier 곡선을 이용한 익형

스플라인(spline)을 이용한 방법 혹은 몇 개의 기본 익형을 중첩하여 사용하는 방법에 비해, Bezier 곡선을 이용하면 제어점의 급격한 변화에도 곡선의 변화는 완만하여 비 현실적인 형태를 만들어 내지 않는 특성이 있다

이 연구에서는 Fig. 2 에 도시한 바와 같이, 익형을 표현하기 위해 흡입면(suction side)에 2 개, 압력면(pressure side)에 2 개, 총 4 개의 Bezier 곡선을 사용하였으며, 전연부(leading edge)는 4-차, 후연부(trailing edge)에 3-차 곡선으로 구성하였다. Bezier 곡선은 시작점이 끝점을 반드시 지나게 됨으로 익형의 가장 두꺼운 두께 부분을 기준으로 2 개의 Bezier 곡선을 사용해 익형을 구현할 수 있다. 즉, 전연부와 후연부를 연결하는 두 Bezier 곡선의 C1 연속성을 만족하기 위해 최대 두께의 두 제어점의 y좌표 값(v_3)을 일치시켰다. 한쪽 면마다 8 개의 제어점이 존재하며 각 제어점 당 2 개의 변수로

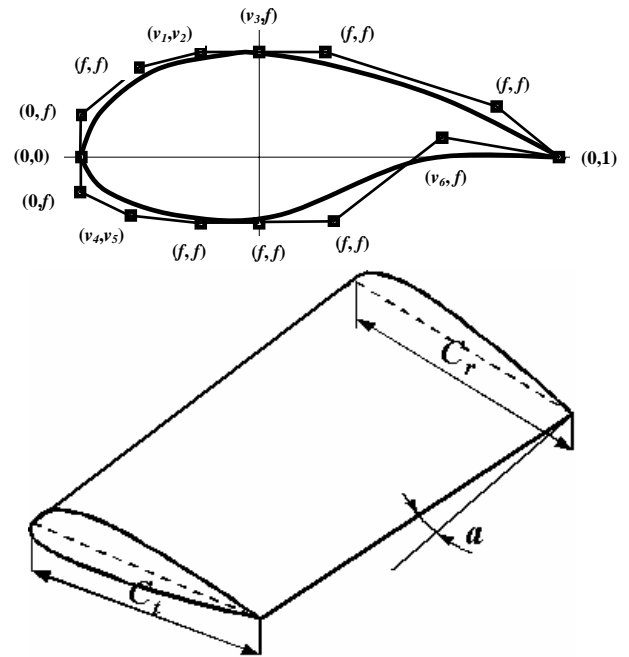


Fig. 1 Airfoil geometry parameterization

구성되며 고정 점인 전연부와 후연부 그리고 최대 두께인 점을 고려해 매개 변수의 개수는 총 18 개로 구성된다. 저자의 2 차원해석을 통하여 18 개의 변수 중 목적함수와 상관관계분석을 통하여 많은 영향을 미치는 6 개의 변수를 선정하였다. 그리고 3 차원 형상을 결정하는 후퇴각(a)과 코드비(C_i/C_r)를 추가적으로 설정하여 총 8 개의 변수를 사용하였다.

3. 유동해석

3.1 지배방정식

열·유체유동을 지배하는 보존방정식을 텐서형태로 나타내면 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

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

운동방정식 :

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

여기서 t 는 시간, u_i 는 각 방향으로의 절대속도 성분을 각각 나타낸다. $\tilde{u}_j (= u_j - u_{cj})$ 는 움직이는 격자에 대한 상대속도이다. $p = p_s - \rho_0 g_m x_m$ 로 피에조 압력을 나타낸다. 여기서, p_s 는 정압, ρ_0 는 기준밀도, g_m 은 중력가속도, 그리고 x_m 는 ρ_0 가 정의된 기준위치로부터의 거리이다. τ_{ij} , s_m , s_i 은 각각 응력 텐서, 질량추가 생성량, 운동량 추가 생성

량을 의미하며, 난류점성 유동에 대한 응력텐서는 다음과 같다.

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

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

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

난류유동에 있어서 u , p 와 τ_{ij} 를 포함한 모든 종속변수들은 시간에 대해 양상불 평균된 것이다. $\overline{u'_i u'_j}$ 항은 Reynold 응력이며, μ_t 는 난류점성계수를 나타낸다. μ_t , ε , k 구하기 위해서는 지배 방정식의 닫힌문제를 해결하여야 하는데, 이 연구에서는 표준 $k-\varepsilon$ 난류모델을 이용한다. 유동해석은 상용소프트웨어인 STAR-CD⁽⁹⁾를 사용하였으며, 3차원 점성, 비압축성, 정상 유동으로 가정하였다.

3.2 해석 모델의 타당성 검증

미우주항공국(NASA)는 NACA 때부터 다양한 익형에 대하여 실험을 수행하고 있다. 그러나 아음속의 익형에 대한 3차원 실험은 그리 많지 않다. 그 중 McAlister⁽¹⁰⁾는 NACA0015의 3차원 익형에 대하여 여러 가지 Reynolds수와 받음각에 대하여 실험을 수행하였다. 그러나 이 실험은 주로 날개의 후류에 초점이 맞추어져 있어 실험값의 보정 없이 계측기로부터 읽은 원시자료를 싣고 있다. 이 값들은 그대로 사용할 수 없으며 수치해석에서 적용한 조건인 외부의 교란이 없는 자유비행상태에 적용하기 위해 McAlister가 제안한 방법에 따라 보정하여 수치해석의 타당성을 검증하였다. Fig.3는 span의 가운데에서부터 tip까지 압력계수(C_p)의 분포를 비교한 것이다. 격자는 table 1에 보는 것과 같이 3가지 경우에 대하여 비교하였다. Fig. 3에서 보듯이 tip영역 제외한 영역에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 최적화는 계산시간과 정확도를 고려하여 Refine01을 사용하였다

4. 결과 및 고찰

최적화를 위한 목적함수는 다음과 같이 정의된다.

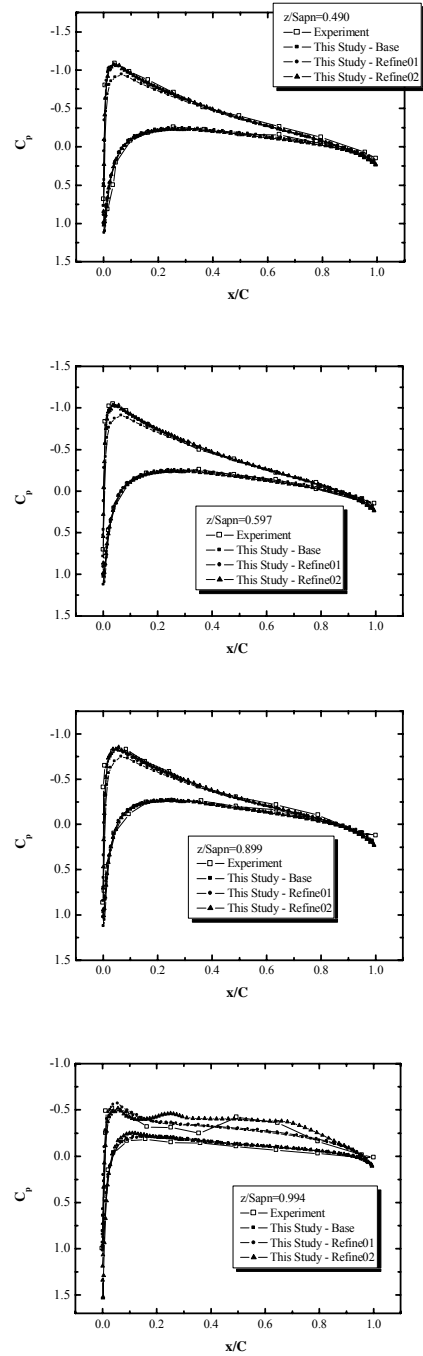


Fig. 3 C_p distribution along mid-span to tip

$$\text{Find } \mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}^T \quad (8)$$

$$\text{to minimize } F_1(\mathbf{X}) = C_d / C_l \quad (9)$$

$$\text{to minimize } F_2(\mathbf{X}) = C_l \quad (10)$$

$$\text{to minimize } F_3(\mathbf{X}) = C_{L,h} - \frac{C_{M,h}}{C_{M,\alpha}} C_{L,\alpha} \quad (11)$$

$$\mathbf{X}_i^L \leq \mathbf{X}_i \leq \mathbf{X}_i^U \text{ for } i=1,10 \quad (12)$$

Table 1 Mesh dependency test for validation

	Number of mesh	y+
Base	220000	200
Refine01	290000	100
Refine02	790000	50

Table 2 Parameters for genetic algorithm

	Value
Population	30
Generation	20
Cross over rate	0.8
Mutation rate	0.5%
Tournament level	2
Niche	1

Table 3 Upper and lower limits of design variables

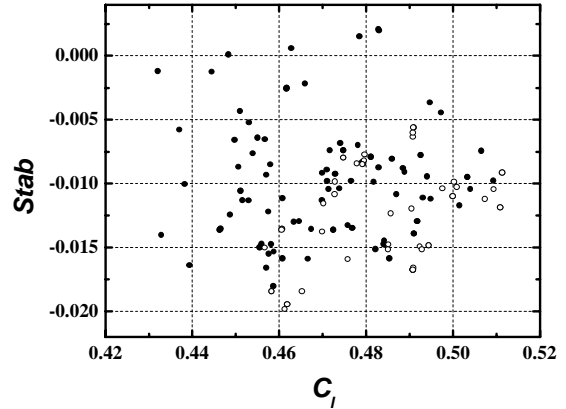
X_i	X_i^L	X_i^U	X_i	X_i^L	X_i^U
v_1	0.100	0.200	v_5	0.035	0.050
v_2	0.080	0.100	v_6	0.700	0.750
v_3	0.200	0.350	v_7	0.700	0.100
v_4	-0.055	-0.035	v_8	-0.200	0.200

WIG의형에서 가장 중요한 양력과 양항비 그리고 정안정성⁽¹¹⁾의 3 가지를 목적함수로 설정하였다. 제약조건은 없으며 단지 설계변수의 상한과 하한만을 가지고 있다. 다목적 최적화를 수행하여 목적함수를 가중하거나 정규화 하지 않고 목적함수의 크기나 최적화 공간의 크고 작음을 고려하지 않아도 된다. WIG선이 지면효과를 받으며 정상운행하는 상태($h/C=0.25$, $\alpha=2$)에 대하여 최적화를 수행하였다. Span/chord는 3으로 비교적 짧게 설정하였다.

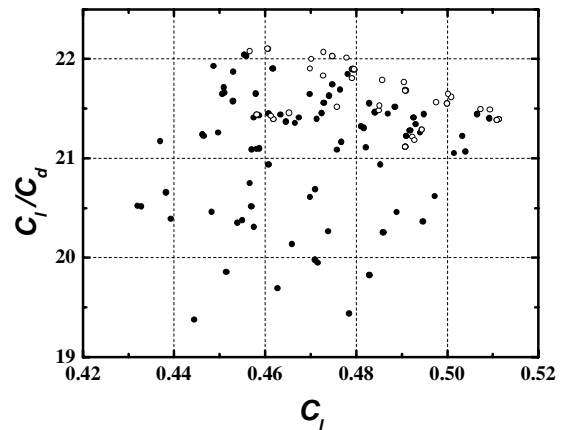
GA를 이용한 최적화를 위한 인수는 table 1에 나타내었다. 세대내의 개체수는 30 개를 사용하였다. 세대 단위 GA를 사용했으며 수렴성을 높이기 위해 선택압(Selection pressure)은 2로 하였다. 각 토너먼트마다 2개의 개체가 임의 선택되어 2번의 경쟁을 통하여 새로운 1개의 부모개체가 선택된다. 자름선은 유용한 유전자인 스키마(schema)의 생존을 효과적으로 극대화 하기 위하여 2개을 사용하였다. 또 채굴(Exploitation)과 탐험(Exploration)의 정도를 유지하기 위하여 0.5%의 돌연변이율을 적용하였다. 만약 새롭게 생성된 자식 개체가 유전적으로 일치하는 일란성 쌍생이 존재하는 경우 이를 제거하고 새롭게 개체를 생성하도록 하였다. 디자인 변수의 범위는 table 2에 나타내었다.

다목적함수의 최적해는 해가 서로 선형적으로 종속되어 있는 경우를 제외하고 유일하게 결정

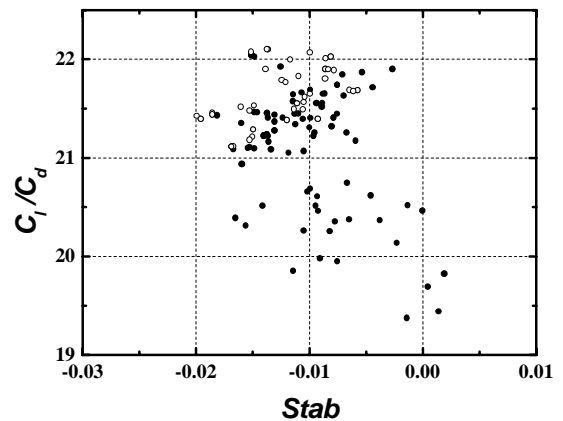
되지 않기 때문에, 크게 지배되는(dominated)해와 지배되지 않는(non-dominated)해로 나눌 수 있다. 지배되지 않는 해는 파레토해로서 다목적최적화에 의한 최적해가 된다.



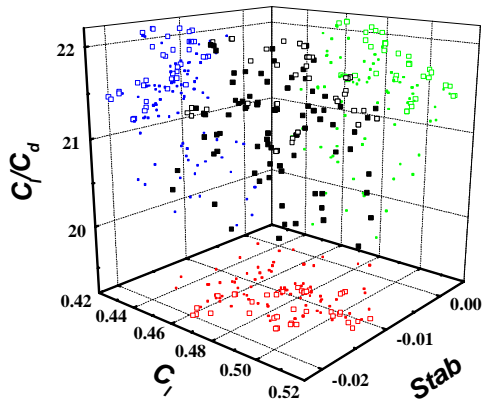
(a) Pareto optimum on $Stab$ vs C_l



(b) Pareto optimum on C_l/C_d vs C_l



(c) Pareto optimum on $Stab$ vs C_l/C_d



(d) Pareto optimum in 3-dimensional design space

Fig. 4 Pareto optimum (hollow) and dominated solutions (filled).

양력은 최대, 정안정은 최소, 양향비는 최대화 문제이다. 디자인 공간을 간단하게 구형이라고 가정하면 Fig. 4 (d)와 같이 가까이 보이는 공간이 최적해가 될 수 있는 공간임을 알 수 있다. SMOGA에 의해 이러한 공간들이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 이를 각각의 2 차원 평면으로 표시하면 3 가지 그림으로 표시될 수 있다. 먼저 양력대 안정성의 평면에 투영한 Fig. 4 (a)을 보게 되면 양력은 최대, 정안정성은 최소의 문제임으로 오른쪽 아래에 공간이 Pareto 해에 해당한다. 다른 한편으로 내부에 존재하는 파레토 해들을 볼 수 있다. 이 해는 3 차원 디자인 공간상에 그린 그림에서 점선으로 표시한 영역에 해당한다. 3 차원 공간상에서는 외곽에 존재하지만 이를 2 차원 공간에 투영하면 그림과 같이 내부의 존재하는 점으로 나타나게 된다. 비슷한 현상들을 나머지 2 차원 디자인 공간에서도 확인할 수 있다. 각각의 투영한 영역에 대해서도 파레토 집합들이 최외곽선들을 따라 생성되는 것 알 수 있다.

5. 결론

저자의 2 차원 WIG의 최적화에서 양력, 양향력, 정안정성에 영향을 주는 중요한 인자만을 이용하여 유한한 길이를 가지는 3 차원 WIG 날개를 최적화하였다. 이전의 상관도 분석에 의한 중요변수만을 이용함으로써 익형을 구성하는 변수를 18 개에서 6 개로 줄일 수 있었으며 이에 추가적으로 3 차원을 형성하는 코드비와 날개의 후퇴각을 추가하

여 최적화를 수행하여 지배되지 않는 파레토 최적해를 얻을 수 있었다. 3 차원 공간상에 존재하는 해를 2 차원의 공간에 사상하여 최적화를 통해 얻은 파레토 해들이 각 디자인 공간의 최일선(Pareto frontier)에 모여지고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 해들은 어떠한 다른 해들에 의해 지배되지 않으므로 전역최적해에 해당하며 적절한 선택을 수행함으로 주어진계에 가장 최적의해를 얻을 수 있다.

참고문헌

- (1) <http://www.imo.org/home.asp>
- (2) Chang-Yeol Joh and Yang-Joon Kim, 2004, "Computational Aerodynamic Analysis of Aifoils for WIG(Wing-In-Ground-Effect) Craft," J. of KASA(Korean), Vol. 32, No. 8, pp.37~46
- (3) Juhee Lee, Byeong-Sam Kim, and Kyoungwoo Park, 2006, Aerodynamic Characteristics and Shape Optimization of Airfoils in WIG Craft Considered Ground Effect, Transaction of KSME B, Vol. 30 No. 11, pp.1084-1092
- (4) 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 Universita di Trieste, Italy
- (5) Goldberg, D., 1989, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addition-Wesley
- (6) 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
- (7) Michalewicz, Z., 1992, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlog
- (8) Booker, L.B., 1987, Improving Search in Genetic Algorithms", in Davis L(Editor), "Genetic Algorithms and Simulated Annealing, Morgan Kaufmann Publishers, Los Altos, CA
- (9) STAR-CD v3.15 Methodology, 2001, Computational Dynamics, Co., London. U. K
- (10) K. W. McAlister, 1991, "NACA0015 Wing Pressure and Trailing Vortex Measurements," NASA Technical Paper3151
- (11)Staufenbiel, R. W., 1987, "On the Design of Stable Ram Wing Vehicles," The Royal Aeronautical Society Symposium Proc., pp. 110-136