

위그선 연구현황과 전산유체역학의 응용

강 국 진*

State-of-the-Art of WIG(Wing-In-Ground Effect) Ships and Application of the Computational Fluid Dynamics

Kuk-Jin Kang

The paper introduces the state-of-the art of WIG ship and application field of the CFD to WIG ship development. WIG ships are highly efficient and fast transport vehicles which take advantage of benefits of ground effect. Chapter 1 describes the characteristics of WIG ship. Chapter 2 reviews the research works of Russia, German, Chinese, Korea and etc. Chapter 3 explains the kind of WIG ship categorized by the main operational mode and take-off system. Chapter 4 describes about the application field of CFD to WIG ship development procedure.

Key Words: 위그선(Wing-In-Ground Effect Ships), 지면효과(Ground Effect), 전산유체역학(CFD)

1. 서론

위그선은 지면효과(Ground Effect)를 이용하여 수면 위를 낮게 떠서 경제적으로 날아가는 선박으로서 기존의 선박으로는 달성하기 어려운 시속 100~500km의 초고속 성능과 우수한 운송효율을 보유하고 있는 차세대 초고속 해상운송 수단이다. Fig. 1은 여러 운송수단들의 속도별 운송 효율을 보여주고 있는데, 위그선은 기존의 운송수단으로는 도달이 불가능한 영역을 채워주고 있다.

지면효과는 공기 중을 비행하고 있는 날개가 지면 또는 수면에 가까워지면 날개 밑의 공기가 고공비행 상태에 비하여 압력이 상승하는 현상을 말하는 것이다. 직선 비행에 의해 날개 아랫면에 일종의 공기쿠션 효과를 발생시키는 것으로서 hovercraft의 정적 공기쿠션과 대비하여 동적 공기쿠션(Dynamic air-cushion) 효과를 의미한다. 공기 중을 비행하는 날개는 수면에 가까워질수록 효율(양력/항력)이 향상되지만, 수면아래의 수중익(hydrofoil)은 수면에 근접

할수록 효율이 떨어지는 경향을 나타낸다. 그리고 날개가 표면에 근접해 있기 때문에 날개 양끝에 생성되는 와류의 생성이 억제되어 저항은 크게 증가하지 않는다. 이 때문에, 양항비가 증가하는 효과를 얻을 수 있다. 이 원리를 이용하여 항주하는 것이 일반적인 항공기 또는 수상기와 가장 다른 점이며, 수면에 접하지 않고 가기 때문에 수면에서 발생하는 파도에 의한 저항이 없어지는 장점이 있다.

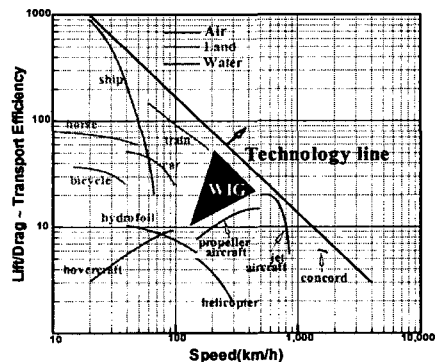


Fig. 1 von Karman-Gabrielli' diagram
위그선의 상부는 항공기의 특징을, 하부는 선박의

*정회원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소
*E-mail : resskj@kriso.re.kr

특징을 띠고 있다. 고속의 항공기 장점과 대량의 화물을 수송할 수 있는 선박의 장점을 취하고 있으며 선박으로 분류되어 국제해사기구(IMO)의 규정이 적용된다.[1] 따라서 선박건조법, 해운 항만법 등 선박에 적용되는 법규에 따라 건조, 운항된다.

고, 따라서 어뢰 등의 수중 공격으로부터도 안전한 장점을 갖는다. 이러한 특성을 이용하여 해양방위용으로 사용된다면 해양경비선이나 상륙함으로 사용될 수 있을 것으로 보인다. 구소련에서 초기에 개발된 대부분의 위그선들은 이러한 군사적 활용을 위하여 개발되었다.[2]

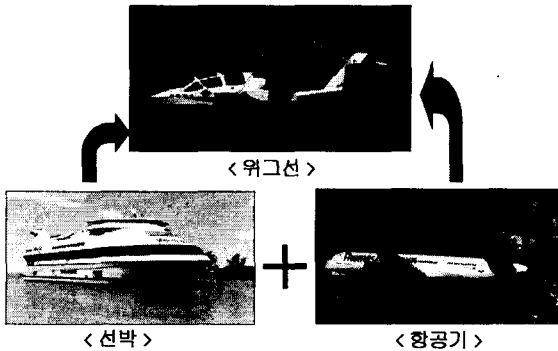


Fig.2 위그선의 형상특성

WIG선의 활용도 측면에서 살펴보면 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 지면효과를 최대한 이용하는 위그선은 비행기에 비해 양항비를 크게 할 수 있으므로 효율적으로 화물 및 승객을 수송할 수 있으며, 선박에 비해 대단히 빠른 속도로 기동할 수 있다. 또한 운항 중에는 승선감이 우수할 뿐만 아니라 비상시에는 언제든지 수면에 착수 할 수 있기 때문에 대형사고의 위험성이 적다. 활주로가 특별히 필요치 않으며 특별한 접안시설 없이 모래사장에도 직접 상륙이 가능할 수도 있다.

이러한 장점을 이용하면 위그선은 매우 광범위하게 활용될 수 있다. 한국 서해는 비교적 파고가 낮으므로 서해를 이용한 한-중 항로에 투입된다면 승객 및 화물 수송을 담당하는 우수한 운송수단이 될 것으로 판단된다. 동남아 국가 부근에 산재하고 있는 도서지방은 상주인구가 적어 비행장 건설 및 시설유지가 곤란한 경우가 많다. 이러한 도서지방을 방문하는 승객 및 화물의 수송에 위그선이 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 그리고 해난 구조선이나 해양탐사선으로 사용된다면 짧은 기간 내에 필요한 해역에 즉시 출동하여 효율적으로 임무를 수행할 수도 있다. 위그선은 수면 위를 낮게 비행하기 때문에 대공 레이더에 포착되지 않으며 수면 레이더에 탐지될 확률이 낮다. 또한 수면 위를 떠서 날아다니기 때문에 수중에서의 음파탐지에서도 포착되지 않

2. 위그선 연구개발 사례

지면효과 현상은 항공 초기시대부터 이미 알려졌으며 스칸디나비아에서 제 2차 세계대전 이전에 시험적으로 위그선이 제작된 바가 있다.

그러나 1960년대에 이르러서야 비로소 첫 번째 중요한 위그선이 제작되었다. 이 분야에 있어서 러시아의 R. Alexeev와 독일의 A. Lippisch의 공헌도가 매우 컸다. 그들은 조선공학과 항공공학이라는 완전히 다른 배경에서 독자적으로 위그선 기술에 대한 연구를 시작했으며 매우 다른 방향의 연구 결과를 보였다. Alexeev는 선박의 속력을 올리기 위한 노력을 해왔다. 그는 위그선을 일종의 날개를 가지고 수면 밑이 아니고 바로 위로 떠서 가는 hydrofoil선으로 생각을 했다. 반면에 항공 공학자인 Lippisch는 비행기가 수면 가까이 날아서 효율을 높이는 잠재력에 관심을 가졌다. 이 두 사람의 영향은 그 이후로 개발된 대부분의 위그선의 근간을 형성하였다고 할 수 있다.[3]

러시아의 Alexeev는 그가 주도했던 CHDB(Central Hydrofoil Design Bureau)에서 냉전시대 군비경쟁의 역사적 배경에 힘입어 거의 무한대의 자금과 연구 인력들의 지원 하에 수많은 시험선들과 카스피해의 괴물로 유명한 KM을 비롯한 대형 위그선들의 개발에 절대적인 역할을 수행하였다. 이 과정에서 PAR(Power Augmented Ram)효과를 이용한 위그선에 대한 연구와 개발을 정립하였다고 할 수 있다. KM, Oriyonok, Volga-II 등 러시아에서 개발된 대부분의 위그선은 PAR효과를 이용한 이수보조 시스템을 도입하는 특징을 가지고 있다.[2]

삼각날개(Delta wing)로 유명한 Lippisch는 독일 국방부의 지원 하에 역삼각날개(Reverse delta wing)의 특징을 갖는 X-114(1977)를 개발하였으며, Lippisch의 연구결과는 이후 Airfish 시리즈(1977-1990), Flightship(2001) 등 1990년대 이후에 독일에서 개발된 대부분의 위그선의 원형이 되었다.

중국에서는 러시아의 기술도입을 통하여 위그선 개발을 시작하였으며, 이후 TY-1(1998, CASTD), XTW-4(1999, CSSRC)와 같은 위그선을 개발한 예가 있다.

그 외에도 일본, 호주 등에서 개발을 시도한 바 있으나 기술적인 결함으로 인하여 실패한 사례가 있다.

한국에서는 1993년 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(이하 '해양(연)')에서 한·러 과학기술교류사업(STEPI)으로 러시아 설계기술자료 도입을 시작으로 위그선 개발을 위한 연구를 시작하였다.[4] 1994년 과기부의 컨소시엄사업(해양(연)-현대, 대우, 삼성, 한진)으로 유인시험선 건조 및 실험역 시운전에 성공한 사례가 있다.[5] 이후 약 10년동안 지속적인 연구개발 노력 끝에 2002년 해양수산부 벤처기업 기술개발지원 사업으로 4인승급 레저용 위그선 설계 기술 개발 및 시제선 건조, 실험역 시운전에 성공(갈매기4호)한 바 있으며[6-7] 2004년부터(~2009년 예정) 20인승급 소형 위그선 개발을 위한 연구가 진행 중이다.

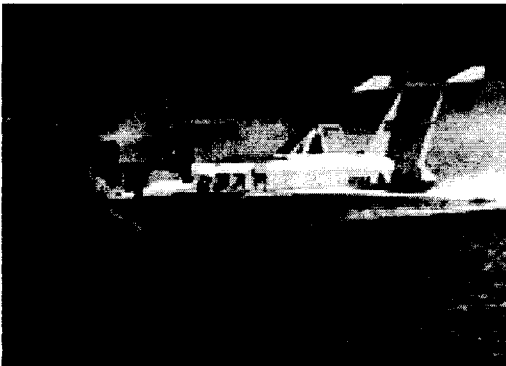


Fig. 3 유인 시험선(갈매기 1호) 실험역 시운전 장면(1994)



Fig. 4 갈매기4호(4인승, 2002, 해양(연))

3. 위그선의 분류

3.1 운항특성에 따른 분류

일반적으로 말해서 위그선은 항상 선박과 항공기의 혼합된 특성을 갖고 있다. 순항 시에 공기력에 의해 비행한다는 측면에서는 전통적인 항공기의 특성을 갖는다. 반면에 이착수 시에는 수력학적인 힘이 작용한다. 그리고 해양환경 하에서 수면에 근접하여 작동하기 때문에 해상 안전이라는 측면에서 WIG선은 일반적인 해양 운송체에 적용되는 수칙과 요구조건 등이 적용되어야 할 것이다. 위그선에 대한 인증 및 안전 규약과 관련하여 위그선의 공식적인 규정을 적용하는데 위와 같은 이유가 매우 중요하게 다루어졌다. 이러한 목적을 위하여 세 가지 기본적인 분류가 적용되었다. 운항특성에 따라 A, B, C의 세 가지 형태로 분류된다.[1]

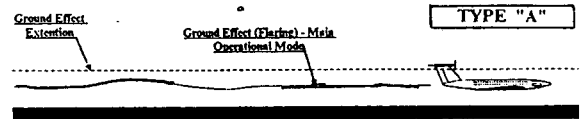


Fig. 5-(a) "Type-A" 위그선의 운항특성

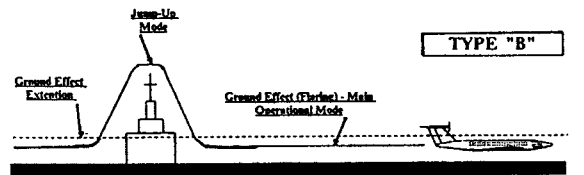


Fig. 5-(b) "Type-B" 위그선의 운항특성

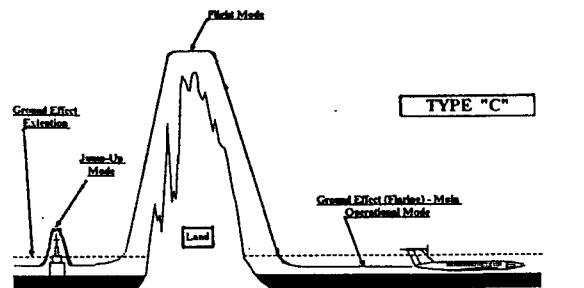


Fig. 5-(c) "Type-C" 위그선의 운항특성

첫 번째 분류("A Type")는 지면효과와 고도 내에서만 기동하는 위그선을 의미한다. 여기에는 일반적으로 작은 종횡비(aspect ratio)(1이하)의 날개를 사용하는 특징이 있다. 조종사에게는 파일럿에게 요구하는 기술을 요구하지는 않으며, 일반적인 고속정을 운항하는 방식과 매우 유사하게 조종하도록 한다. 여기에 속하는 대표적인 위그선은 러시아에서 개발된 Volga-2를 들 수 있다.

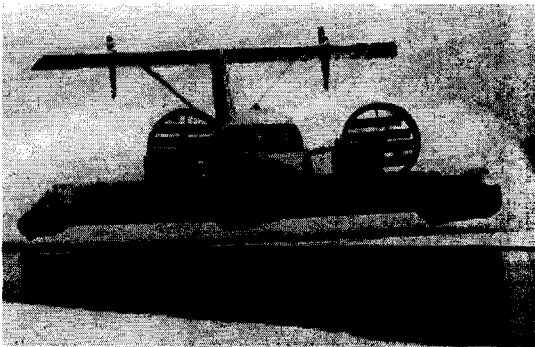


Fig. 6 Volga-2(민수용, 8인승, 1986, 러시아)

두 번째 부류("B Type")는 잠시 동안 지면효과 영역을 벗어나서 단거리 비행을 할 수 있는 것을 의미한다. 이러한 단거리 비행 고도는 항공기의 최저 안전 비행고도를 넘지 않는 것을 의미하는 것으로서 국제민간항공기구(ICAO)의 규약에 따르면 150미터(500피트)이다. 일반적인 형태로는 종횡비 3 이하의 날개와 엘리베이터를 가지고, 파일럿에 의해 조종된다. 여기에 속하는 위그선으로는 러시아의 KM, Orlyonok 등을 들 수 있다.

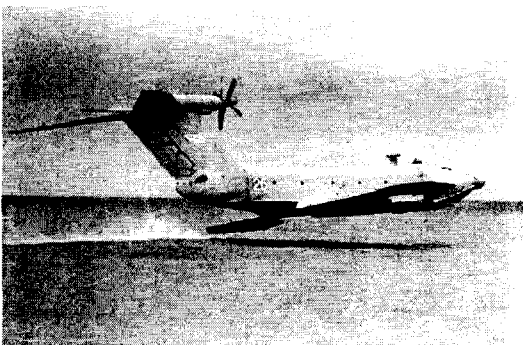


Fig. 7 Orlyonok(상륙작전용, 58×31×16m, 1974, 러시아)

세 번째 부류("C Type")는 지면효과 영역을 벗어나서 일정 시간 이상 비행 할 수 있고, ICAO 규약상의 최저 안전고도 이상으로 상승할 수 있는 위그선을 포함한다. 여기에 속하는 위그선으로는 독일에서 개발된 X-114를 들 수 있다.

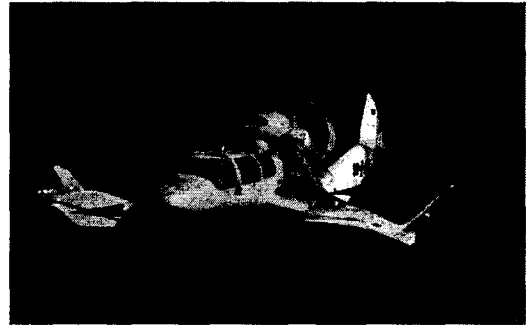


Fig. 8 X-114(군작전용, 13×9×3m, 1977, 독일)

3.2 이수시스템에 의한 분류

위그선은 이수를 위한 시스템의 도입으로 인하여 날개 및 엔진의 형상/위치 등이 구분된다. 이수속도를 줄이기 위하여 러시아에서 주로 도입된 기술은 날개의 앞에 엔진을 장착하고 엔진에서 분사되는 제트를 날개 아랫면에 분사하여 날개아랫면에서 발생하는 램효과를 증폭시키는 기법을 도입하였다. Fig. 6에 나타난 것과 유사한 이러한 시스템을 PAR(Power Augmented Ram)시스템이라 하며 러시아와 중국에서 개발된 대부분의 위그선이 여기에 속한다.

PAR시스템을 도입한 위그선의 경우 날개 앞쪽의 엔진에 의하여 부가적으로 얻어지는 양력이 엔진 추력에 비하여 최대 4배 이상의 부가 양력을 얻을 수 있는 장점이 있으며 이를 이용하여 이수 속도를 줄이고 수면에서 작용하는 저항을 줄일 수 있는 장점을 가진다. 그러나 PAR시스템 도입을 위해 날개 앞쪽에 엔진을 장착하는 경우 파도에 의하여 추진시스템이 파손될 수 있는 위험 때문에 파도가 있는 해상 상태에서 운항이 매우 제한적이라는 한계가 있으며, 순항 중에는 사용하지 않는 엔진을 부가적으로 장착하는 단점이 있다.

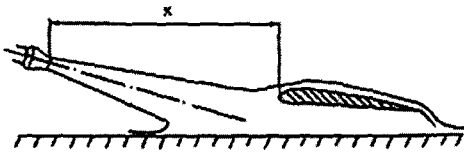


Fig. 9 PAR 시스템 개념도

PAR시스템을 도입하지 않는 위그선의 경우 독일에서 주로 개발되어온 Lippish layout을 적용한다. 이러한 경우 이수시 과도한 저항을 이겨내기 위한 추력이 요구되며, 이러한 현상을 완화시키기 위해 접이식 hydrofoil을 장착하는 경우도 있다. 그러나 hydrofoil을 적용하는 경우 조종자의 실수로 인한 불안정성 야기하기 쉽고 사고의 위험이 크다는 단점이 있다.

그리고 위에 언급한 두 가지 부류와 구분되는 형상으로서 날개를 앞뒤로 배치한 Tandem형 위그선을 들 수 있다. Tandem형 위그선은 Alexeev가 개발한 첫 번째 위그선이었으나, 이수속도가 높고 비행고도가 높아지는 경우 불안정한 특성을 보이는 단점으로 인하여 개발되지 않던 형상이었다.

4. 위그선 연구개발을 위한 CFD응용

위그선 연구개발 과정에서 일반적인 선박이나 항공기와 구분되어 다루어지는 연구 분야들은 매우 광범위하다. 항공기와 선박의 복합적인 형태로서 항공기에서 요구되는 특성과 선박에서 요구되는 특성들을 모두 필요로 하기 때문이다.

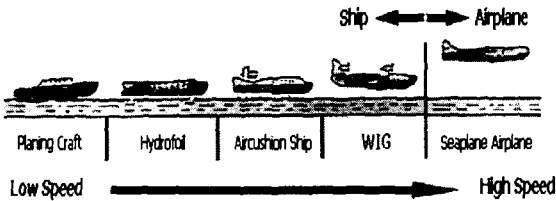


Fig.10 위그선의 속도영역

위그선 연구과정에서 중요하게 다루어지는 연구주제들은 매우 다양하나 유체역학(aero-hydro dynamics)적 부분과 관련된 주요부분은 다음과 같이 요약할 수 있다.

먼저, 파도에서 이수를 위한 시스템의 구성을 들

수 있다. 위그선의 이수속도는 일반적인 선박으로서 거의 도달하기 어려운 속도영역에 속한다. 이러한 영역에서 선체에 작용하는 저항은 전체 작동범위에서 가장 크게 작용한다. 따라서 선체에 작용하는 저항에 대한 정확한 해석은 위그선에 장착되는 추진시스템의 구성에 결정적인 역할을 한다고 할 수 있다. 선체에 작용하는 저항에 대한 정확한 해석을 위해서는 조파저항, 마찰저항 등과 같은 hydrodynamics의 연구를 필요로 하며, 이러한 저항에 영향을 미치는 수면접촉면적과 위그선의 자세는 날개에서 발생하는 양력, 엔진추력 등과 연계되어 있는 특징을 가진다. 특히, 파도에 의한 부가저항 및 자세변화에 미치는 영향 등에 대한 연구를 필요로 한다. 그리고 착수 시 선체에 작용하는 저항 및 파도에 의한 부가저항에 대한 연구는 선체의 구조설계를 위하여 필수적인 부분이다.

공기역학적인 측면에서 위그선에 대한 연구는 주로 위그선을 위한 날개단면(wing section)과 안정성에 대한 부분은 들 수 있다.[8-12] 위그선에 적용되는 날개단면 형상은 일반적인 항공기에 적용되는 형상과는 구분되는 특징을 가진다. 지면효과 영역 내를 비행하는 날개주위의 압력 분포는 비행고도에 따라서 매우 민감하게 영향을 받는다. 일반적으로 항공기에 적용되는 익형을 위그선의 날개에 적용하는 경우 아랫면에서 발생하는 Venturi효과에 의해 아래쪽 방향의 힘이 발생하게 된다.

위그선에 적용되는 날개 형상은 종안정성(logitudinal stability) 확보와 매우 밀접한 관련성을 가진다. 항공기의 경우 비행 중 날개주위의 압력분포는 주로 받음각에 의해 결정되지만 위그선의 경우에는 받음각과 비행고도에 의해 결정된다. 즉, 받음각과 비행고도에 따라서 압력분포와 날개에 작용하는 모멘트가 변화하게 된다. 이러한 현상에 의하여 위그선에는 피치각에 대한 중립점(neutral point)와 고도에 대한 중립점 두 개의 중립점들이 존재하고, 이러한 중립점들 간의 적절한 관계에 의해 종방향 안정성이 결정된다. 이러한 안정성 특성은 날개 형상, 꼬리날개 등과 매우 밀접한 관련성을 가지고 있으며, 안정성 특성을 개선하기 위하여 특별하게 고안된(S-shaped camber) 익형을 적용하기도 한다. 그러나, 안정성만을 지나치게 강조하는 경우 날개의 양력특성, stall 특성 등이 저조하게 나타날 수 있다. 이러한 경우 이수 전에 선체에 작용하는 저항을 크게 할 수 있는

문제점을 가지고 있다.

위그선 날개의 형상 중 항공기와 구분되는 또 하나의 특성은 끝단판(endplate)을 적용하는 것이다. 일반적인 항공기의 경우 끝단판을 적용하면 양항비 특성이 저조해지지만 위그선의 경우 날개아랫면의 공기의 측방향 유출(lateral leakage)을 방지함으로써 양항비를 크게 향상시키는 장점을 가진다.

이상에서 언급한 유체역학적인 연구 분야들에 대해서 연구 발표된 사례가 일부 있으나 미미한 현실이다. 특히, 가장 왕성한 연구가 진행된 러시아의 경우 전산유체역학이 발달하기 이전인 1960년대-1980년대에 주요한 연구가 진행되었으며, 실험적인 방법으로 이루어졌고 방대한 실험 결과를 이용한 설계 자료들은 군사적 비밀에 붙여졌기 때문에 공개된 자료는 극히 미미한 실정이다.

전산유체역학 기법의 발달로 인하여 이전에 실험적으로 수행되었던 방대한 연구가 전산해석으로 수행할 수 있는 부분도 매우 넓어졌다. 위그선에 대한 전산유체역학의 응용 연구들은 광범위하게 수행될 수 있다. 그 분야들에 대해 개략적으로 정리하면 다음과 같다.

- 고속 활주선에 대한 저항 해석
- 조파저항 등의 수면에서 발생하는 저항의 최소화를 위한 하부 선형 최적화
- 이착수 시 파도에 의한 부가저항, 충격력 등에 대한 해석
- 날개 형상에 대한 공기역학적 해석
- 지면 효과를 고려한 양력 특성 및 안정성 특성 향상을 위한 날개 형상 최적화
- 선체, 끝단판 등을 포함한 전체 형상에 대한 공기역학적 해석
- 자유수면 효과를 고려한 지면 효과 해석
- 주 날개, 조종면, 꼬리날개 등에 대한 Flutter해석

참고문헌

- [1] 2002, Interim Guidelines for Wing-In-Ground(WIG) Craft, IMO, MSC/Circ. 1054.
- [2] V.N. Kirillovikh, 1995, "Russian Ekranoplans," Proc. of a Workshop on Twenty-First Century Flying Ships, Sydney.
- [3] <http://www.se-technology.com/wig/index.php>
- [4] 1995, 한국기계연구원 선박·해양공학연구소, 표면효과익선 관련 러시아 보유기술 조사사업, 한·러 과학기술협력사업 보고서.
- [5] 1996, 한국기계연구원, 대우, 삼성, 한진, 현대중공업, 여객수송용 소형 표면효과익선(WIG선) 개념설계 기술 개발(I), 한·러 과학기술 협력사업 보고서, 과학기술정책관리연구소.
- [6] 1998, 한국기계연구원, 대우, 삼성, 한진, 현대중공업, 여객수송용 소형 해면효과익선(WIG선) 개념설계 기술개발(II), 한·러 과학기술 협력사업 보고서, 과학기술정책관리연구소.
- [7] 1999, 한국해양연구소 선박해양공학분소, 부양추진 시스템 개발, 중형해면효과익 여객선 핵심기술개발 과제 보고서, 산업자원부.
- [8] 1997, V.I. Zhukov, Features of Aerodynamics, Stability and Controllability of Ekranoplans, Moscow.
- [9] N.V. Kornev, S-H. Van, 1995, "Investigation of the Aerodynamic Characteristics of Two Dimensional Wing Section Near the Ground," 유치활용결과보고서, 한국기계연구원 선박·해양공학연구소.
- [10] N.V. Kornev, S-H. Van, 1995, "Numerical Study of the Aerodynamic Characteristics and Stability of Ekranoplans with Various Wing Configuration," 유치활용결과보고서, 한국기계연구원 선박·해양공학연구소.
- [11] M.S. Shin, C.J. Yang, S.I. Yang, G.-Q. Wang, 1999, "Numerical Simulation of Viscous Flow Around a Three-Dimensional Wing in Ground Effect with Endplates," FAST'9.
- [12] M.S. Shin et al, 1997, "Wind Tunnel Test Results for Eight and Twenty Passenger Class Wing-In-Ground Effect Ships," FAST'97.