

고속 활주선의 항주자세 추정

A Prediction on Running Attitude of High Speed Planing Craft

오광호*, 유재훈†*

Kwang-Ho Oh*, Jae-Hoon Yoo†*

요 약 문

수치 계산으로 고속 활주선의 저항 성능을 평가하기 위해서는 활주 상태에서의 항주자세 예측이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 항주자세의 변화가 큰 고속 활주선의 경우에는 활주 자세에 따라 선저 바닥면에서 나타나는 압력 변화에 의한 동적 부양력 변화가 크므로 단순히 정지 중 흡수를 기준으로 계산되어진 유체력으로 항주자세를 예측하기 보다는 자세 변화에 따른 동적 부양력의 변화와 이에 의한 자세 변화를 반복 계산을 통해 수렴시키는 것이 요구되어진다. 본 연구에서는 선형화된 자유수면 조건의 포텐셜 수치 계산으로 유체 동압력인 부양력을 계산해 내고 이를 유체 정역학적 힘으로 간주하여 부력과 선체중량과의 힘과 트림 모멘트 평형 관계를 만족시키는 방법으로 반복적인 계산을 통해 수렴된 활주 자세를 얻어내었다.

※ **Keywords** : 항주자세, 활주선, 부양력, 선형 자유수면, 포텐셜, 반복계산

1. 서 론

고속으로 운항하는 선박들은 선속이 증가함에 따라 크게 증가하는 저항을 줄이기 위해 독특한 방법들을 채택하고 있으며 이에 따른 특징적인

형태의 선형을 가지게 된다. 활주선(planing boat), 쌍동선(catamaran), 수중익선(hydrofoil ship), 공기부양선(air cushion vehicle) 등이 그것이다. 이 중 고속 활주선은 일정한 선속 이상에서는 유체동역학적인 힘에 의해 선체가 부양하게 되며

* 목포대학교 해양시스템공학과

† 논문주저자

부양 효과로서 마찰저항과 조파저항 등의 저항을 줄여주게 된다. 따라서 고속 활주선의 설계와 유체 역학적 성능 추정에는 활주 상태에서의 항주자세에 대한 정확한 정보나 추정이 요구되어진다. 항주자세는 유체 동역학적인 힘과 유체 정역학적인 힘, 추진기에 의한 추력, 부가물에 의한 유체력 등과 선체 중량과의 평형에 의해 결정되며, 이 중 유체 동역학적인 힘에 해당하는 부양력에 의해 선체의 중량이 대부분 지지되게 된다. 즉, 항주자세는 선체 무게, 부력, 무게 중심, 부력 중심과 부양력 중심이 서로 평형을 이루는 과정에서 트림(trim)과 흡수침하(sinkage)의 형태로 나타나게 된다.

고속 활주선은 항주자세 변화도 크며 그에 따라 저항도 크게 변하게 된다. 이러한 항주자세를 측정하기 위해 선박을 구속(captive) 또는 비구속(non-captive, semi-free) 상태에서의 모형시험법에 대한 연구들이 수행되어 왔다. 구속 시험법은 선체 모형을 구속시켜 자세 변화를 가지지 못하도록 한 상태에서 계측되는 힘들로 자세를 추정하는 방법이며(Shin, et al., 2004, Kim, et al., 2009), 비구속 시험법은 상하 방향 및 종동요의 구속이 없는 상태로 예인하여 자세 변화를 허용한 후 자세를 추정하는 방법이다. 구속 조건 시험은 계측된 힘들로 자세 변화를 계산해 낸 후 변화된 자세로 반복적인 실험을 해야 하는 번거로움과 이에 의한 오차가 발생할 수 있는 어려움이 있으며, 비구속 예인 시험은 항주자세가 정상(steady)에 이르는 시간이 길어 비교적 길이가 긴 수조가 필요하며, 유체역학적인 힘의 직접적인 계측이 불가능하다는 문제가 있다.

본 연구에서는 시간적, 경제적으로 이점을 가지고 있는 수치해석 프로그램을 사용하여 발생하는 부양력을 구하고 힘의 평형관계를 이용하여 자세를

예측하며, 이를 반복적으로 계산하여 항주자세를 추정하였다.

1.1. 고속선의 종류

고속선은 선박의 속도 U , 길이 L 과 중력가속도 g 에 의해 무차원화된 수인 Froude수($Fn = U/\sqrt{gL}$)가 비교적 높으며, Fn 은 파장과 길이의 비인 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Fn = U/\sqrt{gL} = \sqrt{\lambda/2\pi L} \quad (1)$$

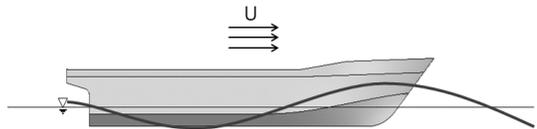


Fig. 1 Wave Profile along Hull Surface

즉, Fn 는 선체가 일으키는 파도의 파장과 배 길이의 비의 제곱근으로 생각할 수 있고, 고속선은 배에 의해 생성된 파도의 파장이 배의 길이에 비해 상당히 긴 선형이다. 선박은 일정 선속($Fn=0.4$) 이상에서 파도의 파장이 길어져 저항이 급격히 증가하는 ‘wave barrier’ 현상이 나타나며, 소요 동력 또한 선속의 3승에 비례하여 증가한다. 따라서 고속선은 저항을 줄여주기 위한 특별한 방법이 필요하며, ITTC(International Towing Tank Conference, 국제수조협회)에서는 Fig. 2와 같이 선종별로 고속선을 분류하고 있다.

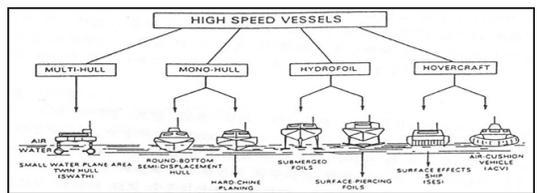


Fig. 2 High-Speed Marine Craft

1.1.1 배수량형 선형

반 활주형 선형(semi-displacement hull form), 활주형 선형(planing hull form)으로 나타 내지는 고속정을 주계열로 정의한다. 반활주선은 부력과 항주 시 발생하는 동역학적인 양력에 의해 선체가 지지되고, 활주선은 양력에 의해 선체 중량의 대부분이 지지된다.

1.1.2 수중익을 사용하는 고속정

반 잠수형 수중익선(surface piercing hydrofoil craft), 완전 잠수형 수중익선(submerged hydrofoil craft)으로 나뉜다. 전자는 스스로 복원 성을 가지고 있으며 소형에 적합하고, 후자는 내항 성능이 우수하고 낮은 저항으로 대형에 적합하다.

1.1.3 Air cushion을 이용하는 고속선

공기 부양실 내부의 공기압력으로 선체를 지지 하는 방식으로 Air cushion에 의한 양력은 배수 부력에 가까운 성질을 가지고 있어서 수중익의 유체 동역학적 양력에 구별하여 동력에 의한 양력(power lift)으로 말할 수 있으며 대형화도 가능한 실정이다. 하지만 내항성능이 취약하다는 단점이 있다.

1.1.4 복합선형(Hybrid 형) 고속선

부력, 동역학적 양력 및 공기부양을 혼합해서 사용하는 선형을 말한다.

1.2 활주선형의 특징

이러한 고속정 중에서 본 논문의 주 관심 대상 선형인 활주(Planing)선에 대한 구체적인 특징은 다음과 같다.



Fig. 3 Running Attitude of Planing Craft

활주선의 원리는 항주 시 선저에서 발생하는 유체 동역학적 힘인 부양력(Lift force)에 의해 Fig. 3과 같이 선체를 수면 위로 부양시켜 항주자세가 크게 변한다는 가장 큰 특징을 갖는다. 부양으로 인한 침수형상 및 표면적 감소로 저항이 대폭 줄어들게 되고, 이러한 항주자세에 따라 저항 특성이나 침수 면적이 크게 변화하므로 이를 정확히 예측하는 것이 선형 평가 및 저항 추정에 가장 중요하다고 말할 수 있다. 실선 시운전이나 비구속 모형선 저항시험 으로 활주자세 계측이 가능하지만 낮은 선가로 인한 모형시험이 어렵다는 단점이 있다. 또한 수치계산 으로 자세추정이 가능하지만 항주자세에 따라 수치계산을 위한 패널 및 격자를 재 생성해야 하며 자세변화가 큰 대변형에선 정확한 수치계산 방법이 정립되어 있지 못하다는 어려움이 있다.

이러한 항주자세를 측정하기 위해 선박을 구속(captive) 또는 비구속(non-captive, semi-free) 상태에서의 모형시험법에 대한 연구들이 수행되어 왔다. Ikeda등에 의해 제안된 구속 시험법은 선체 모형을 구속시켜 자세 변화를 가지지 못하도록 한 상태에서 계측되는 힘들로 자세를 추정하는 방법이며, 비구속 시험법은 상하 방향 및 종동요의 구속이 없는 상태로 예인하여 자세 변화를 허용한 후 자세를 추정하는 방법이다. 구속 조건 시험은

계측된 힘들로 자세 변화를 계산해 낸 후 변화된 자세로 반복적인 실험을 해야 하는 번거로움과 방대한 실험량이 필요하며 전차로부터 전달되는 진동 등의 외란에 의한 오차가 발생할 수 있는 어려움이 있으며, 비구속 예인 시험은 항주자세가 정상(steady)에 이르는 시간이 길어 비교적 길이가 긴 수조가 필요하며, 유체역학적인 힘의 직접적인 계측이 불가능하다는 문제가 있다.

기존에 활주선에 대한 연구는 오래전부터 국외에서 대부분 이루어졌다. Savitsky[10]는 주상체형 활주면에 대한 유체력에 관한 경험식을 다양한 실험을 통해 정립하였으며 이러한 식들은 현재 실제 선형 설계 단계에서 사용되고 있다. 하지만 이러한 식들은 선체를 전체 침수 활주면에 대해 일정한 trim각, 일정한 deadrise, 일정폭을 가지는 단순한 형태의 썸기(wedge)로 가정 후 연구 수행해 나온 결과들로 초기 성능 추정 외에 복잡한 선저 형상을 지닌 실제 선형의 설계에 사용하기엔 어려움이 있다.

일본에서도 근래에 다양한 연구 논문 들이 발표되었다. Hirano, Himeno, Maruo, Hayashita, Katayama(1990~)등은 고속선의 저항 특성 및 모형시험 방법, 자세제어 방식 저항시험, 모형을 이용한 고속 활주선의 저항 시험 법 등 주로 고속선의 모형시험에 관한 연구들을 수행하였다.

김병남[1]은 수치해석을 이용하여 고속선에 대한 연구를 수행했는데, VOF(Volume of Fluid)법에 의한 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석에 의해 고속 활주선 모형주위의 유동과 저항 성능 해석을 하였다. 이는 수치계산을 위해 모형 시험에서 계측되어진 항주자세를 사용하였다는 특징이 있으며 항주자세를 직접 추정하지는 않았다. 수치계산으로도 항주자세를 계산할 수는

있으나 항주자세에 따라 수치계산을 위한 패널 및 격자를 재 생성해야 하는 어려움이 있으며 대변형 자세변화에 대한 수치계산법이 정립되어 있지 않다.

이에 본 논문에서는 포텐셜 수치계산을 이용하여 항주자세를 추정할 수 있는 방법을 개발하고 추정된 항주자세를 CFD를 이용하여 저항 성능을 평가해 보았으며, 이러한 결과가 선형의 우열 평가 및 설계에 적용가능 한지를 판단해 보았다.

2. 활주 선형의 항주자세 추정

2.1 선체에 작용하는 유체력

선박은 기본적으로 좌우 대칭이므로 길이방향에서의 자세 변화를 추정하였다. 이를 위해 정지 중과 항주 중 선체에 작용하는 힘들에 대한 정의를 하였다.

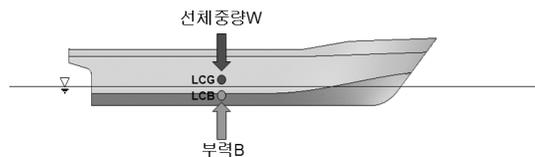


Fig. 4 Force Diagram in Static Condition

먼저 정지 상태에서 선체에 작용하는 유체력들에 대해 알아보면 Fig. 4와 같다. 선체 중량(W)은 유체 정역학적 힘인 부력(B)과 그 크기가 균형을 이룬 상태에서 길이방향으로 동일 선상에 위치하여 떠있게 된다. 여기서 길이방향의 무게중심(LCG, Longitudinal Center of Gravity)은 설계 흘수에서의 길이방향의 부력중심(LCB, Longitudinal Center of Buoyancy)으로 간주하였다.



Fig. 5 Force Diagram in Running Condition

다음으로 Fig. 5는 항주 중 선체에 작용하는 유체력들을 도시한 것이다. 항주 중에는 정역학적인 힘인 부력(B), 동역학적 힘인 부양력(L), 추진기에 의한 추력(T), 선체 부가물에 의한 유체력 등이 선체 중량과 평형을 이루어 항주자세를 결정한다. 이러한 힘들과 모멘트는 다음의 평형관계가 성립하여야 한다.

$$T(1-t) \cdot \cos\theta = R \quad (2)$$

$$W = B + L \quad (3)$$

$$W \cdot LCG' + B \cdot LCB' + L \cdot LCL' = 0 \quad (4)$$

여기서 t 는 thrust deduction factor이며 LCG' , LCB' , LCL' 는 모멘트중심과의 거리이고 θ 는 trim angle이다. 고속 활주선의 경우 부양력에 의해 선체중량의 대부분이 지지되며 항주자세는 선체무게와 부력, 부양력이 각각의 중심들과 서로 평형을 이루는 과정에서 트림(trim)과 흡수침하(sinkage)의 형태로 나타난다. 본 논문에서는 전진 방향의 힘 성분들에 의한 자세 변화가 크지 않다는 가정 하에 수직 방향 성분인 W , B , L 의 평형관계를 이용하여 흡수 및 트림 변화로 항주자세를 추정하는 방법을 사용하였으며 동역학적 힘인 부양력을 수치해석으로 계산해내었다.

2.2 포텐셜 수치해석을 위한 문제의 정식화

고속 활주선은 그 항주 특성상 점성에 대한

영향이 거의 없다고 볼 수 있다. 따라서 물을 이상 유체로 가정한 포텐셜(Potential) 해석을 하여 부양력을 찾아내었다. 포텐셜 해석을 위해 한국 해양연구원 해양시스템안전연구소(MOERI)에서 개발한 WAVIS1.4를 사용하였다. 본 수치해석 프로그램은 Hess & Smith(1962)가 개발한 패널법(Panel Method)에 Dawson[8]이 제안한 Rankine 소오스를 분포한 방법을 사용하고 있다. 자유수면 조건식은 선형(linear)으로 균일류를 모유동으로 선형화한 Kelvin 자유수면 조건식을 사용하고 있다. WAVIS는 비선형(nonlinear) 자유수면 조건도 포함하고 있으며 그 수치해가 더 정확하다고 알려져 있지만 비선형 해는 계산시간이 많이 걸릴 뿐만 아니라 해를 얻기 위해서는 자유수면이 선체표면과 만나는 선까지 패널을 분포해야 할 때 그 분포가 비선형 해의 수렴 과정에서 계속 변해 해의 수렴이 어렵다는 단점이 있다. 또한 고속 활주선의 경우 차인(chine)을 가지는 선형이 대부분이며 양력이 차인 아래 선저에서 대부분 발생한다고 생각할 수 있으므로 선형 자유수면 조건을 사용해도 문제가 없다고 생각하였다. 이어서 트랜섬 선미(transom stern)를 가지는 선형의 선미 파계를 표현하기 위해 유동 비 접촉(dry transom) 조건을 사용한다.

2.2.1 지배방정식과 경계조건

일정 속도 U 를 갖는 정상유동(steady flow) 해석에서 좌표계는 배의 중앙에 고정된 우수좌표계를 택하고 x 축은 선미 방향, y 축은 우현, z 축은 상방향으로 하였다. 유체를 비점성, 비압축성, 비회전성으로 가정하면 전체 속도포텐셜(ϕ)이 있는 포텐셜 유동으로 정의할 수 있으며 다음과

같이 균일유동(uniform flow)과 교란유동(perturbed flow)의 속도포텐셜(ϕ)로 나누어 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi = \vec{U} \cdot \vec{x} + \phi \quad (5)$$

속도포텐셜(ϕ)는 지배방정식으로 연속방정식인 라플라스 방정식(Laplace equation)을 만족시켜야 한다.

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

다음으로 만족시켜 주어야 할 경계조건으로 물체 표면에서의 운동학적 경계조건인 비침투(impermeability)조건으로 유동이 대상 선체 표면에 반드시 접해야(tangential)한다는 조건이고 이것은 아래의 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = Un_x \quad \text{on the body} \quad (7)$$

여기서 n_x 는 물체 표면 방향이다.

또 다른 경계조건으로 대상 구조물은 자유수면의 경계면에서 운항하므로 자유수면이 중요한 역할을 하는데 자유수면에서의 압력이 대기압이어야 한다는 조건으로부터 다음의 동적 자유수면 조건식(dynamic free surface condition)을 만족하여야 한다.

$$g\eta + \frac{1}{2}(\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2 - 1) = 0 \quad (8)$$

on the free surface

자유수면에서 만족되어야 할 또 다른 조건으로 자유수면에서는 유동이 자유수면에서 접해야

한다는 조건으로부터 아래의 운동학적 자유수면 조건식(kinematic free surface condition)을 만족시켜야 한다.

$$\phi_x \eta_x + \phi_y \eta_y - \phi_z = 0 \quad (9)$$

on the free surface

해저면에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on the bottom} \quad (10)$$

마지막으로 방사조건을 만족시켜야 한다.

$$\nabla \phi = (1, 0, 0) \quad \text{at } x = -\infty \quad (11)$$

2.2.2 수치해법

경계치 문제의 수치해석에 있어 경계면을 패널로 분할하고, 이들 패널 상에 지배방정식을 만족하는 기본해를 분포시켜 경계면 상에서의 경계조건을 만족시키도록 기본해의 세기를 결정함으로써 경계치문제의 해를 구한다.

지배방정식인 라플라스 방정식을 만족하는 속도포텐셜을 선체와 자유수면을 패널로 분할하고, 각 패널 상에 세기가 일정한 식의 기본해인 $1/r$ 을 분포하여 다음 식으로 표현한다.

$$\phi(x, y, z) = \int_{Hull+FS} \sigma(q) / r(p \cdot q) ds + x \quad (12)$$

위 식은 지배방정식인 라플라스 방정식을 만족하므로 이산화 과정을 통해 선체와 자유수면에서의 경계조건을 만족하도록 소오스의 세기를 결정한다. 따라서 기본해의 세기를 미지수로 하는 선체와 자유수면 패널 수와 같은 방정식을 풀게 된다.

2.3 부양력 산출 및 자세 추정법

2.3.1 부양력계산

활주형 선박은 속도를 가지고 항주하게 되면 선저에 작용하는 유체 동역학적인 힘인 부양력(lift force)이 발생하며 이로 인해 배가 부양하게 되고 트림을 가지고 기울어지게 된다. 즉, 항주자세는 정지 중 배수량과 같은 크기인 선체중량(W)과 정적 유체력인 부력(B), 동적 유체력인 부양력(L) 등 세 힘에 의해 결정된다. 따라서 유체 동역학적인 힘인 부양력(L)을 수치계산 결과 값을 이용하여 계산해 내었다.

Fig. 6는 계산 전과 후의 선체 패널 분포를 보여 주고 있다. 수치계산의 선체 표면의 패널은 선형 자유수면 조건에 맞게 자유수면 아래에만 패널을 재 분포하게 된다.

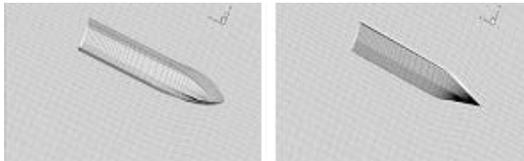


Fig. 6 Panel Distributions before and after calculation

수치 계산을 통해 선체 표면상의 각 패널에 대한 좌표 값과 패널 중심 좌표 값, 중심에 작용하는 유체 동압(dynamic pressure, C_{pd})항 뿐만 아니라 거기에 유체정압(static pressure, C_{ps})항이 포함된 압력(CP) 값이 무차원화 되어 나온다. 각 패널에서 계산된 압력 계수들을 적분하여 전진 방향의 조파 저항계수(C_W)와 수직 방향으로 선체를 부양시키는 유체동역학적인 힘, 즉, 부양력(Lift)을 무차원화 한 부양력계수(C_L)를 얻을 수 있다. 이를 수식화하면

다음과 같다.

$$C_W = \sum_{i=1}^{NB} -C_{pi} n_{xi} A_i / \sum_{i=1}^{NB} A_i \quad (13)$$

$$C_L = \sum_{i=1}^{NB} -C_{pdi} n_{zi} A_i / \sum_{i=1}^{NB} A_i \quad (14)$$

여기서 A 는 각 패널의 면적이다.

위의 두 값은 각 패널에 작용하는 압력 계수들을 각각의 패널의 전체 면적에 대한 yz 평면과 xy 평면에 대한 투영면적 비율만큼 분리한 후 적분한 값으로 방향 성분별 값이 된다.

본 연구에서는 3차원 공간상에 네 개의 점으로 이루어진 패널을 두 개의 삼각형 평면으로 가정하고 그 면적과 중심을 구하였다. 패널의 꼭지점 좌표를 알고 있으므로 각 변의 길이를 알 수 있다. 세변의 길이를 알고 있을 때 삼각형의 면적을 구하는 공식인 헤론(Heron)의 공식을 사용하여 각 패널의 전체 면적을 계산하였다. 각 변의 길이를 a, b, c 라 하면,

$$S = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \quad (15)$$

$$s = \frac{a+b+c}{2} \quad (16)$$

위의 S 는 삼각형의 넓이이고, s 는 삼각형 둘레의 절반에 해당하는 값이다. 이렇게 계산된 압력계수가 타당한지 검증하기 위해 조파저항 계수를 수치계산으로 직접 적분한 값과 비교한 결과 그 오차가 0.05% 이내로 계산됨을 확인하였다.

각 패널의 면적을 구하면 패널에 작용하는 압력의 상하 수직방향 성분을 알 수 있으므로 C_L 을 구할 수 있으며, 부양력(L)은 다음과 같이 차원화되어 진다.

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 S C_L \quad (17)$$

여기서 U는 배의 속도, S는 선체 표면 중 침수된 면적이다.

또한, 다음의 일차모멘트 중심 계산식으로 모멘트 평형 식에 사용될 중요 변수인 길이 방향의 부양력 중심(LCL)을 구할 수 있다.

$$LCL = \frac{\sum_{i=1}^{NB} (-C_{pdi} n_{zi} A_i \times x_i / L)}{\sum_{i=1}^{NB} (-C_{pdi} n_{zi} A_i)} \times LBP \quad (18)$$

2.3.2 자세 추정을 위한 트림 중심의 고려

항주자세를 추정하는데 있어서 그 트림의 중심을 선박의 길이 방향에서 어디에 위치시킬지가 자세 추정 방법에 있어서 중요한 변수가 될 수 있었다. 이에 기존에 선박계산에서의 트림 중심이 어디에 위치하는지와 자세변화가 큰 고속선의 경우 트림 중심에 대한 고민이 필요하였다.

기존의 선박의 자세 추정 방법은 자세 변화가 작은 상태의 대형 상선의 방법이 사용되어졌다. 고속선의 경우 다음의 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.

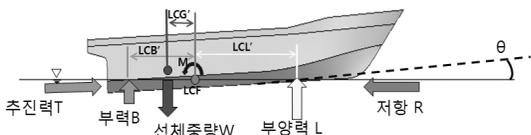


Fig. 7 Force Diagram in a small Variation

추진력과 저항에 의한 자세변화가 작다고 가정하면 부면심을 모멘트 중심으로 다음의 식과 같은 모멘트 평형식을 구성할 수 있다.

$$B \times LCB' = W \times LCG' + L \times LCL' \quad (19)$$

즉, 저속 선박의 경우와 같이 소변형이 일어날

경우 부면심(F)를 중심으로 트림(trim)이 발생하는 것으로 간주하였으며, 자세에 대한 미소 변화율인 TPC(tons per centimeter), MTC(moment to change trim centimeter)로 항주자세 변화를 계산하였다. 참고로 MTC 계산식에 필요한 종메타센터 반지름(BM)도 LCF를 지나는 횡축에 대한 수선면의 관성모멘트를 이용하여 계산한다.

하지만 이러한 방법은 자세변화가 작은 경우이며 고속 활주선과 같이 그 항주자세 변화가 큰 대변형에서도 수선면 중심에서 자세가 변화한다고 생각하기엔 무리가 있었으며 선체에 작용하는 힘들 중 가장 큰 힘이 작용하는 중량 중심에서 그 트림 변화가 발생한다고 생각하였다. 이를 고속선의 경우 다음 Fig. 8로 나타낼 수 있다.

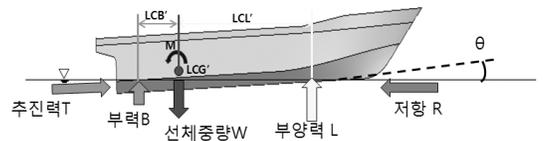


Fig. 8 Force Diagram in a large Variation

여기에서도 다음과 같은 모멘트 평형식을 정립할 수 있다.

$$B \times LCB' = L \times LCL' \quad (20)$$

아직 자세 변화에서 그 트림 중심에 대한 확신이 없는 상태이므로 두 가지 트림 중심인 F와 G에서 그 자세를 계산하여 모형시험 결과와 비교해 보았다.

2.3.3 항주자세 추정 방법 개발

선체의 항주자세는 수치계산으로 계산한 부양력(L)과 부양력 중심(LCL)을 이용한 흘수 변화와

중방향 트림 모멘트 변화를 통해 찾아내었다. 다음은 자세 추정 방법에 대한 flow chart를 보여 주고 있다.

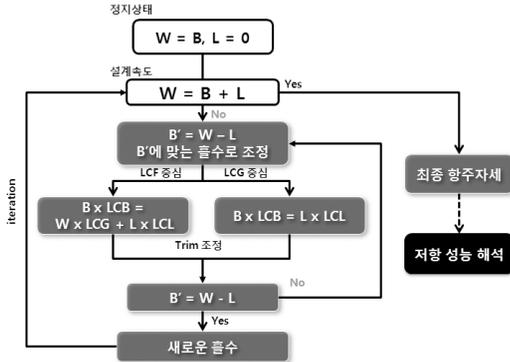


Fig. 9 Flow chart for Planing Attitude Prediction

선박은 최초 정지 상태에서 선체의 중량과 부력이 동일한 크기로 길이 방향으로 동일한 수직선 상에 위치하여 떠있게 된다. 즉,

$$W = B, L = 0 \quad (21)$$

$$LCB \times B = LCG \times W \quad (22)$$

두 방정식이 자동으로 만족되어지게 되며, 일반적으로는 설계 값에 해당하는 선수와 선미 흘수가 주어지게 된다.

정지 상태에서 수치계산을 수행하면 선체를 부양시키려는 유체 동역학적 힘인 부양력이 발생한다. 앞서 정리한 부양력 계산식으로 L을 계산한다. 이렇게 구한 L을 정역학적인 힘으로 간주하여 B와 W의 평형식에 대입한다. 식은 다음과 같다.

$$W \neq B + L \quad (23)$$

발생한 L의 크기만큼 줄어드는 부력인 B'를 찾아내어 그 양에 해당하는 만큼에 배수용적을 흘수

조정으로 찾아낸다.

이러한 세 힘은 그 작용점이 각각 다르므로 선체에 트림모멘트가 작용하고 다음의 두 가지 중심에서의 모멘트 평형식으로 선체를 트림시켜 준다. 부면심 중심인 경우,

$$B \times LCB = W \times LCG + L \times LCL \quad (24)$$

중량중심의 경우는,

$$B \times LCB = L \times LCL \quad (25)$$

이렇게 찾아낸 자세는 트림을 시켜 줌으로서 L에 의하여 변화된 B'의 크기가 바뀌게 된다. 따라서 다시 한 번 흘수를 조정하여 B'에 맞는 흘수를 찾아낸다.

다시 조정된 흘수에서 모멘트 평형이 깨지므로 역시 마찬가지로 다시 트림 조정을 해준다. 이러한 방식으로 두세 번 반복하여 한 번의 수치계산으로 첫 항주자세를 찾아내었다.

이러한 새로운 흘수와 자세를 갖는 선체는 최초 정지 상태의 수치계산과 다른 부양력이 발생하므로 다시 수치계산을 수행하여 새로운 부양력을 계산해 낸다. 부양력이 계산되면 마찬가지로 흘수와 트림을 이용하여 발생한 부양력에 맞는 항주자세를 찾아내었다.

같은 방법으로 반복(iteration)적으로 수치계산을 수행하여 계산된 자세에서 발생한 부양력 L과 부력 B의 합이 선체 중량과 같아 질 때 최종적으로 그 항주자세를 수렴시켰다. 통상 5~6번 정도의 iteration을 거치면 그 항주자세가 수렴하는 것을 알 수 있었다.

이렇게 개발된 자세 방법의 큰 틀은 수치계산으로 계산해낸 유체동역학적 힘인 부양력을 정역학적

힘으로 간주하여 흘수와 트림 조정으로 부양력을 상쇄시키는 방법이라고 설명할 수 있다.

2.4 항주자세 추정

항주자세 추정을 위해 다음 세 가지 선형에 대해 수치해석을 수행 후 자세 추정 방법을 이용하여 항주자세를 계산하였다. 세 선형 모두 예인 수조에서 모형시험 결과를 가지고 있어 추정된 자세를 모형시험의 그것과 비교하여 개발된 항주자세 추정 방법의 타당성을 검토하였다.

세 선형에 대한 기본 제원 및 형상을 각각 Table 1과 Fig. 10에 나타내었다.

Table 1 항주자세 추정 대상 선형들의 기본 제원

$L_{BP} (m)$	46.9	35.0	7.124
Design Speed (kts)	20	25	25
F_n	0.48	0.694	1.538

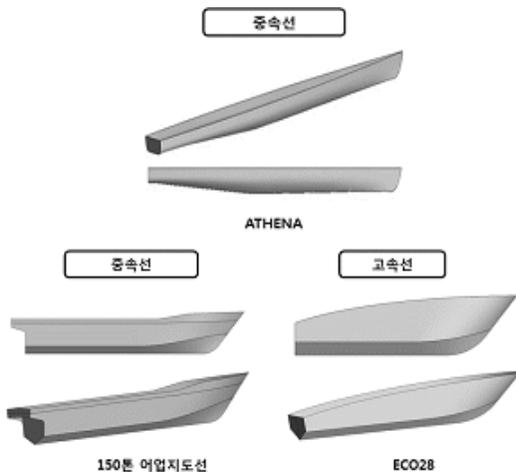


Fig. 10 Hull Form

2.4.1 ATHENA 선형의 항주자세 추정

(1) 선체와 자유수면 패널 분포

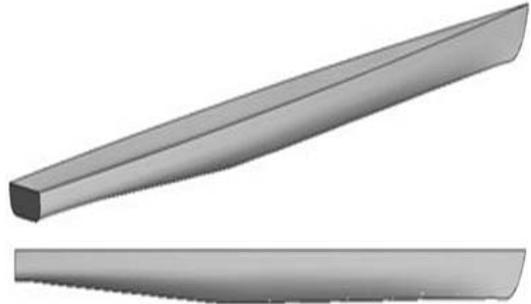


Fig. 11 Hull Form of the ATHENA

Table 2 Principal Dimensions of the ATHENA

$L_{BP} (m)$	46.9
$B (m)$	6.25
$T (m)$	1.51
Displacement Volume (m^3)	213.0
Wetted Surface Area (m^2)	287.7
Design Speed (m/s)	10.29

첫 번째 선형은 DTNSRDC(DAVID W. TAYLOR NAVAL SHIP RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER)에서 축적비 1/8.25를 갖는

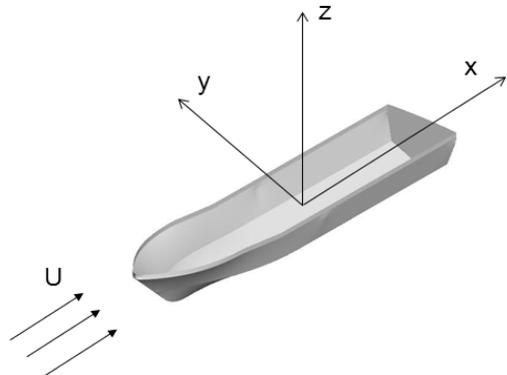


Fig. 12 Coordinates system

모형선을 예인실험 하여 그 결과가 공개되어 있는 비교적 낮은 속도를 가지는 선형을 선택하여 항주 자세를 추정해 보았다. ATHENA 선형의 특징은 설계속도의 $F_n=0.48$ 인 고속선으로 선저가 둥근 형태를 가지고 있으며 차인이 없다는 특징이 있다.

Fig. 12는 수치해석을 위한 좌표계를 나타내고 있다. 본 논문에 사용된 수치계산 좌표는 그림과 같은 우수 좌표계를 사용하였다.

Fig. 13은 수치해석을 위해 선체 표면에 분포시킨 패널을 보여주고 있다. 패널은 선체중심면(centerplane)과 중앙면(midship), 그리고 정수면(calm free-surface)을 기준으로 생성하였다. 포텐셜 계산을 수행하기 위한 패널은 실선의 수선간 길이(LBP)로 무차원화 하여 설계 속도(design speed, 20kts)에 맞추어 생성하였다.

유재훈[6]은 수치해법의 안정성을 검사하기 위해 패널 개수에 대한 해의 수렴도를 파악하였다. 선체 표면에 분포된 패널의 수가 흐름 방향으로 30개 이상이면 비교적 신뢰성 있는 결과로 수치 해가 수렴

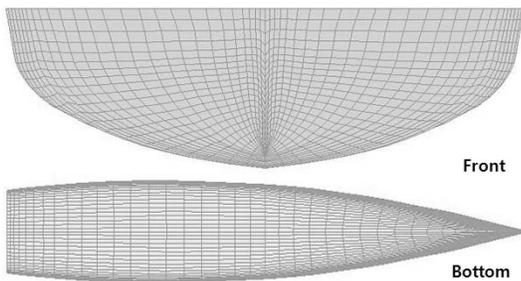


Fig. 13 Panel Distribution of Hull Surface

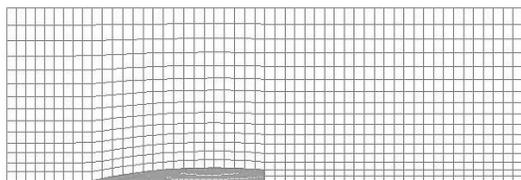


Fig. 14 Panel Distribution of Free Surface

한다는 사실을 밝혔다. 이에 본 선체에는 길이방향으로 40개 폭 방향을 21개 총 840개의 패널을 선체 표면에 분포시켰다.

Table 3 Computational conditions of potential method

F_n	0.48
Computational domain	$-1.0 \leq x/L_{BP} \leq 2.0$ $0 \leq y/L_{BP} \leq 1.0$
Free surface panels	788 ($52 \times 14 + 30 \times 2$)
Free surface boundary condition	Linear

Fig. 14는 설계속도에서의 자유수면에 분포시킨 패널을 보여주고 있다. 자유수면에 분포할 패널의 수는 Table 3과 같이 분포시켰으며, 선체 표면에 분포된 패널을 기준으로 결정하였다.

(2) 항주자세 및 계산 수렴 결과

반복적인 수치해석 과정에서의 각 단계별 항주 자세를 나타내는 선수·선미 흘수와 트림 각을 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Variation values each of iteration (LCF 중심)

	static	1st	2nd	3rd	Exp.
$T_F (m)$	1.51	0.899	0.918	0.908	1.158
$T_A (m)$	1.51	1.685	1.720	1.718	2.321
Trim (deg)	0	0.96	0.98	0.99	-1.42
Trim (m)	0	0.786	0.802	0.810	1.163
$C_L (\times 10^3)$	20.779	17.803	18.712	18.289	
L (MN)	0.316	0.251	0.266	0.260	
LCL	-10.69	-15.30	-15.62	-15.51	

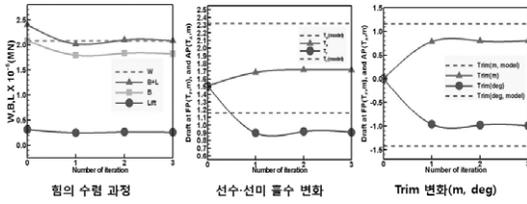


Fig. 15 Convergence History of Running Attitude

Fig. 15는 계산으로 구한 항주자세를 모형시험 결과와 비교한 그래프이다. 3번의 반복적인 자세 추정으로 계산 결과가 수렴하는 것을 알 수 있었다. 오른쪽 첫 번째 그림의 트림 변화를 봤을 때 수치 해석 자세가 모형시험 결과보다는 좀 더 작은 트림 각을 나타내 주었으며 가운데 그림에서 보이는 흘수 값에서는 수치해석 자세가 선수는 더 많은 부양과 선미는 더 적은 침하량을 나타내고 있었다. 즉, 선체의 침하가 더 작게 계산되었다.

본 선형에서는 수치해석을 이용하여 개발된 자세 추정 방법으로 항주자세를 계산해 낼 수 있음을 확인하였고 좀 더 다양한 선형의 자세를 추정하여 그 결과들을 전체적으로 비교해 보는 과정이 필요하다고 생각하였다.

2.4.2 150톤 어업지도선의 항주자세 추정

(1) 선체와 자유수면 패널분포

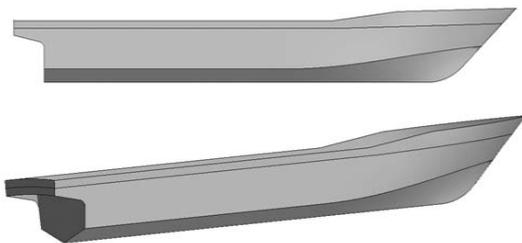


Fig. 16 Hull Form of the Fisheries Supervision Ship(150T)

Table 5 Principal Dimensions of 150T

L_{BP} (m)	35.0
B (m)	7.0
T (m)	1.7
Displacement Volume (m^3)	230.3
Wetted Surface Area (m^2)	260.5
Design Speed (m/s)	12.86

설계속도에서의 Fn가 0.694인 반 활주형 선형으로, 본 선형은 MOERI 예인 수조에서 모형시험을 수행하여 그 결과가 잘 정리된 선형으로 김병남[1]이 CFD를 활용하여 선체주위의 유동해석을 수행하여 저항 특성을 연구한바 있다.

Fig. 17은 선체 표면에 분포시킨 패널(panel)의 모습을 보여주고 있다. 패널은 선체중심면(center-plane)과 중앙면(midship), 그리고 정수면(calmfree-surface)을 기준으로 생성하였다. 포텐셜 계산을 수행하기 위한 패널은 실선의 수선간 길이(LBP)로 무차원화하여 설계 속도(design speed, 25kts)에 맞추어 생성하였다. WAVIS 자체적으로 off-set을 기반으로 한 선체 표면 패널을 생성해 주지만 활주선의 경우 차인라인과 같은 불연속 형상이 존재하고 선수 및 선미, 차인라인(chine line) 부근과 같은 유동의 변화가 심하다고 생각하는 곳에 패널을 밀집시켜 주기 위하여 격자 생성 상용 프로그램인 Gridgen 15.17을 사용하여 선체 패널을 생성해 주었다.

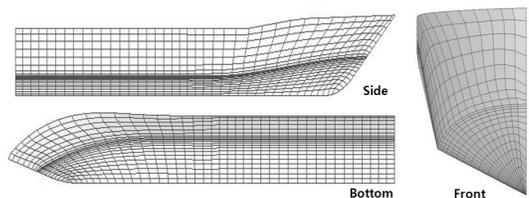


Fig. 17 Panels distribution of Hull surface

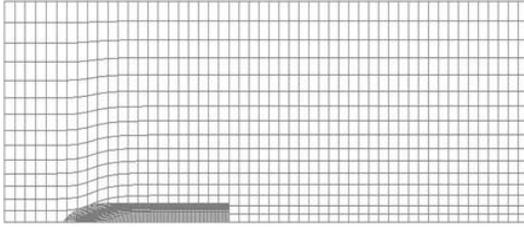


Fig. 18 Panel distribution of Free surface

Table 6 Computational conditions of potential method

Speed (kts)	Fn	Computational domain	Free surface panels
20	0.555	$-1.0 \leq x/L_{BP} \leq 2.0$ $0 \leq y/L_{BP} \leq 1.0$	788 (52×14+30×2)
25	0.694	$-1.0 \leq x/L_{BP} \leq 3.0$ $0 \leq y/L_{BP} \leq 1.3$	788 (52×14+30×2)
30	0.833	$-1.0 \leq x/L_{BP} \leq 5.0$ $0 \leq y/L_{BP} \leq 2.0$	1,317 (65×18+49×3)
32	0.888	$-1.0 \leq x/L_{BP} \leq 3.0$ $0 \leq y/L_{BP} \leq 1.3$	1,317 (65×18+49×3)

항주자세는 4개의 모형선 예인 속도 20, 25, 30, 32kts에서의 자세를 추정하였다. 따라서 각각의 속도에 맞는 자유수면 계산영역과 패널 개수를 설정해 주었다. Fig 2.7은 설계속도에서의 자유수면(free surface)에 분포시킨 패널을 보여 주고 있다. 선체 표면과 마찬가지로 해의 수렴도를 파악하기 위해 자유수면상에 분포할 패널의 수를 선체 표면에 분포된 패널을 기준으로 결정하였다. 또한, 자유수면 영역의 설정이 계산 결과에 큰 영향을 주는 것과 파계 현상을 수치적으로 정확히 묘사하기 위해서는 발생된 파계에 충분한 패널의 밀도가 필요함을 알았다. 이를 위해 선속에 의해 계산되어지는 선수파의 파장을 발생 파계의 기본 파장으로 가정하고 기본 한 파장 정도는 수치계산

영역에 포함시키기 위하여 계산 영역을 확장해 주었다. 자유수면에 대한 수치계산 영역은 기본 파장에 비례하는 값으로 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

$$\frac{\lambda}{L_{BP}} = 2\pi \frac{U^2}{gL_{BP}} = 2\pi Fn^2 \quad (26)$$

트랜섬 후방의 패널 개수는 자유수면에 분포시킨 패널의 모양을 보고 결정하였다. 각 속도별로 자유수면의 계산 영역과 패널 개수를 Table 6에 나타내었다.

(2) 항주자세 및 계산 수렴 결과

먼저 트림 중심을 다르게 하여 항주자세를 추정한 결과를 비교하기 위해 설계속도인 25kts에서의 F와 G를 중심으로 한 항주자세를 계산후 비교해 보았다. Table 7은 F를 중심으로 한 반복계산 마다의 흘수와 트림 변화량이며, Table 8는 G를 중심으로 계산된 값들이다.

Table 7 Variation values each of iteration (LCF 중심)

	static	1st	2nd	3rd	4th	Exp.
$T_F(m)$	1.7	1.073	1.15	1.107	1.111	0.96
$T_A(m)$	1.7	1.946	2.005	2.024	2.028	2.252
Trim (deg)	0.0	1.43	1.40	1.50	1.50	-2.114
Trim (m)	0.0	0.873	0.855	0.917	0.917	1.292
$C_L (\times 10^6)$	11.943	6.427	6.974	6.610	6.643	
L(MN)	0.257	0.130	0.145	0.137	0.138	
LCL	-12.90	-27.48	-26.27	-27.92	-27.86	

Table 8 Variation values each of iteration (LCG 중심)

	static	1st	2nd	3rd	4th	Exp.
$T_F(m)$	1.7	1.076	1.154	1.108	1.115	0.96
$T_A(m)$	1.7	1.943	2.003	2.024	2.025	2.252
Trim (deg)	0.0	1.42	1.39	1.50	1.49	-2.114
Trim (m)	0.0	0.867	0.849	0.916	0.910	1.292
$C_L (\times 10^6)$	11.943	6.457	7.005	6.622	6.640	
L(MN)	0.257	0.131	0.145	0.137	0.138	
LCL	-12.90	-27.31	-26.13	-27.88	-27.87	

Table. 7, 8에 나와 있는 값들을 비교해 봤을 때 각 계산 단계별 값들이 거의 유사하게 계산됨을 알 수 있었으며, 수치계산 상에서는 중심을 어디에 위치시키던지 결국 같은 자세로 수렴한다는 것을 알 수 있었다.

다음으로 4개의 속도 영역에서 G를 중심으로 하는 항주자세의 수렴 상태와 선수·선미의 흘수 변화와 트림각의 변화를 모형시험 결과와 비교하였다.

Table 9 Variation values each of iteration (20kts)

	static	1st	2nd	3rd	4th	Exp.
$T_F(m)$	1.7	1.117	1.141	1.113	1.110	1.114
$T_A(m)$	1.7	1.912	1.965	1.98	1.984	2.319
Trim (deg)	0.0	1.30	1.35	1.42	1.43	1.922
Trim (m)	0.0	0.795	0.824	0.867	0.874	1.175
$C_L (\times 10^6)$	18.769	13.969	14.268	14.095	14.095	
L(MN)	0.259	0.182	0.188	0.185	0.185	
LCL	-11.64	-18.39	-18.55	-18.97	-18.97	

Table 10 Variation values each of iteration (25kts)

	static	1st	2nd	3rd	4th	Exp.
$T_F(m)$	1.7	1.076	1.154	1.108	1.115	0.96
$T_A(m)$	1.7	1.943	2.003	2.024	2.025	2.252
Trim (deg)	0.0	1.42	1.39	1.50	1.49	-2.114
Trim (m)	0.0	0.867	0.849	0.916	0.910	
$C_L (\times 10^6)$	11.943	6.457	7.005	6.622	6.640	
L(MN)	0.257	0.131	0.145	0.137	0.138	
LCL	-12.90	-27.31	-26.13	-27.88	-27.87	

Table 11 Variation values each of iteration (30kts)

	static	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	Exp
$T_F(m)$	1.7	1.103	1.212	1.152	1.171	1.158	1.163	0.887
$T_A(m)$	1.7	1.946	2.012	2.038	2.037	2.044	2.043	2.150
Trim (deg)	0.0	1.38	1.31	1.45	1.42	1.45	1.44	2.068
Trim (m)	0.0	0.843	0.8	0.886	0.866	0.886	0.88	1.263
$C_L (\times 10^6)$	7.509	2.498	3.096	2.610	2.739	2.653	2.653	
L(MN)	0.233	0.073	0.094	0.078	0.083	0.080	0.080	
LCL	-14.05	-47.85	-40.40	-48.43	-46.21	-47.88	-47.88	

Table. 12 Variation values each of iteration (32kts)

	static	1st	2nd	3rd	4th	Exp.
$T_F(m)$	1.7	1.119	1.238	1.185	1.193	0.855
$T_A(m)$	1.7	1.943	2.014	2.034	2.042	2.131
Trim (deg)	0.0	1.35	1.27	1.39	1.39	2.088
Trim (m)	0.0	0.824	0.776	0.849	0.849	1.276
$C_L (\times 10^6)$	6.320	1.519	2.102	1.668	1.702	
L(MN)	0.223	0.051	0.073	0.057	0.059	
LCL	-14.36	-67.59	-51.18	-65.03	-64.05	

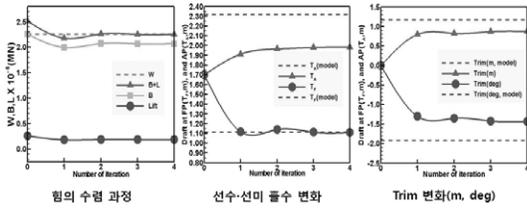


Fig. 19 Convergence History of Running Attitude (20kts)

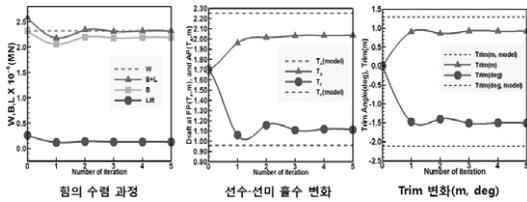


Fig. 20 Convergence History of Running Attitude (25kts)

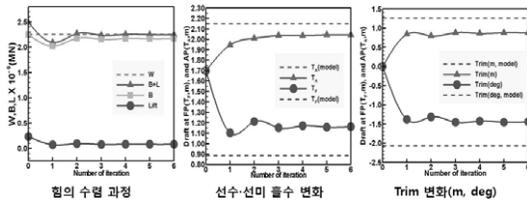


Fig. 21 Convergence History of Running Attitude (30kts)

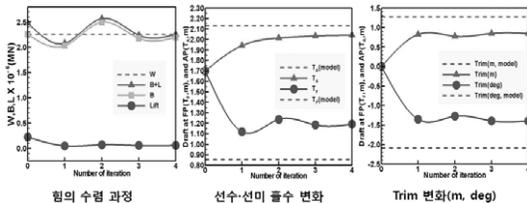


Fig. 22 Convergence History of Running Attitude (32kts)

4개의 속도 영역에서 항주자세를 계산한 결과 5~6번의 반복계산 안에 수렴하는 자세를 얻을 수 있었다. 각각의 자세를 모형시험과 비교해 볼 때 선미 침하와 선수 부양이 작게 계산되었고 이로 인한 트림 각도 작게 추정되었다. 하지만 각 속도

별로 비슷한 정도의 자세 차이가 발생하는 점으로 미루어 의미있는 해석이 가능함을 엿볼 수 있었다.

2.4.3 Eco28 수치해석

(1) 선체와 자유수면 패널 분포

본 선형은 '지식경제부 해양레저장비산업 경쟁력 강화사업의 파워보트 시제선 개발'의 연구과제를 수행하며 개발한 선형으로 부산대 예인 수조에서 모형시험을 하였으며 중소조선연구원이 실해상에서 모형시험을 수행해 그 결과가 잘 정리되어있는 선형이다.

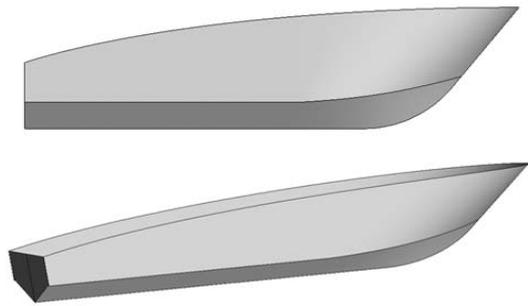


Fig. 23 Hull form of Eco28

Table 13 Principal Dimensions of Eco28

L_{BP} (m)	7.124
B (m)	2.83
T (m)	0.46
Displacement Volume(m^3)	3,691
Wetted Surface Area(m^2)	19,159
Design Speed(m/s)	12.86

다음은 수치계산을 위해 선체 표면에 분포시킨 패널 Fig. 24이다.

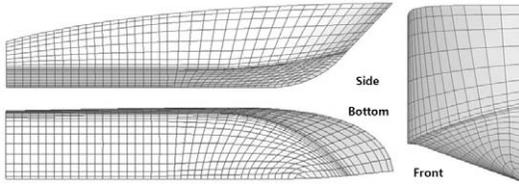


Fig. 24 Panels distribution of Hull surface

어업지도선과 같은 방법으로 수선간 길이(LBP)로 무차원화 하여 설계속도(25kts)에 맞추어 패널을 생성하였다. 선수나 차인라인 부근에 패널을 밀집시켰으며 폭이 있는 차인에 가지는 선형으로 계산 결과의 정확성을 높이기 위해 차인에 폭 방향 패널을 더 밀집시켜 주었다. 패널의 개수는 길이방향 40개, 폭방향 21개로 840개의 패널을 분포시켰다.

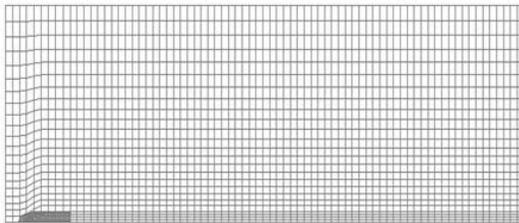


Fig. 25 Panels distribution of Free surface

Table 14 Computational conditions of potential method

Fn	1.538
Computational domain	$-1.0 \leq x/L_{BP} \leq 11.0$ $0 \leq y/L_{BP} \leq 4.0$
Free surface panels	1,839 ($75 \times 21 + 66 \times 4$)
Free surface boundary condition	Linear

Fig. 25는 자유수면에 분포시킨 패널을 보여주고 있다. 어업지도선과 같은 방식으로 기본 파장에 비례하여 길이방향의 계산 영역을 확장해 주었다.

어업지도선과 같은 방법으로 수치계산 결과로 유체 동압력인 부양력을 계산해 내고 iteration 과정을 거쳐 항주자세를 계산하였다.

(2) 항주자세 및 계산 수렴 결과

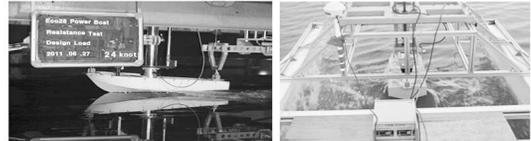


Fig. 26 Model Test in Design speed

위 Fig 26은 예인 수조 및 실 해상에서의 모형 시험 사진이며 설계속도(25kts)에서의 선수·선미 파계를 보여주고 있다.

다음은 모형 시험 결과로 나온 항주자세 및 전저항(CTM)을 속도 별로 표시한 그래프이다.

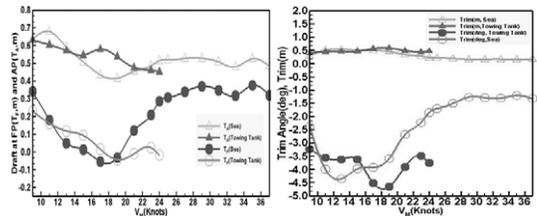


Fig. 27 Sinkages & Trim of Model Test

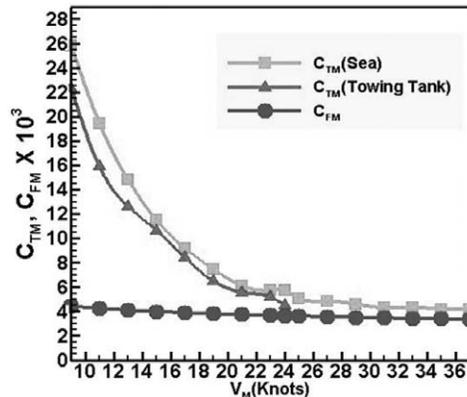


Fig. 28 Total Resistance Coefficients (Model Test)

모형 시험 결과를 살펴보면 예인 수조에서는 설계 속도에 미치지 못하는 시험을 수행하였고 두 결과에서 보이듯이 저항값은 비슷하게 나타나지만 항주자세에 있어서는 다소 차이가 발생하고 있다. 따라서 모형시험의 항주자세는 참고 비교 수준으로 개발된 자세 추정 방법으로 찾아낸 자세와 비교하였다.

다음은 수치해석을 이용하여 찾아낸 항주자세를 Table 15와 그래프로 나타내었다.

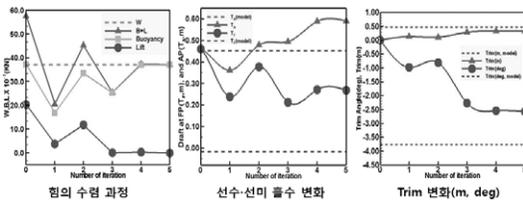


Fig. 29 Convergence History of Running Attitude

Table 15 Variation values of each iteration

	static	1st	2nd	3rd	4th	5th	Exp
$T_F(m)$	0.46	0.238	0.377	0.212	0.271	0.269	-0.018
$T_A(m)$	0.46	0.361	0.478	0.494	0.588	0.590	0.451
Trim (deg)	0.00	0.99	0.81	2.27	2.55	2.58	3.77
Trim (m)	0	0.123	0.101	0.282	0.317	0.321	0.469
$C_L (\times 10^3)$	12.532	3.658	7.960	0.081	0.224	0.104	
L(MN)	20.371	3.700	11.806	0.102	0.338	0.157	
LCL	0.220	-1.217	-0.711	-183.465	-94.380	-205.522	

중량중심(G)을 트림 중심으로 하고 자세를 수립 시킨 그래프이다. 이를 부산대 예인 수조에서 시행한 모형 시험 결과와 비교하였다. 트림 각에서 1°가량 차이를 보이고 있으며 이로 인해 선수·선미에서의 흘수 차이가 나타나고 있다. 하지만 비교적

모형 시험 결과와 큰 차이는 나타나지 않고 있음이 확인되었다.

본 선형은 고속 파워보트의 개발 선형으로 추정된 항주자세를 고려할 때 선형 설계 시 반영할 수 있는 차인 위치에 관한 정보를 얻을 수 있었다. 또한 정확한 모형 시험 결과에 대한 확인이 필요한 것을 고려하여 항주자세에 대한 절대적인 비교는 무리라고 보여진다.

2.4.4 추정된 항주자세에 대한 고찰

앞서 3가지 선형에 대한 항주자세를 추정해 보았다. 모형시험 결과와 비교했을 때 약간의 오차가 발생하였고 여기서는 각 선형의 항주자세를 속도별로 바라봤을 때 흘수와 트림 각에서 결과의 어떤 경향이 나타나는지를 파악해 보고자 했다.

Table 16 Comparison of draft, sinkages and trim

ATHENA (T=1.51, LBP=46.9, Fn=0.48)			
	model	potential	Difference/ L_{BP} ($\times 10^2$)
$T_F(m)$	1.158	0.908	0.533
$T_A(m)$	2.321	1.163	1.286
Sinkage (m)	1.163	0.81	0.753
Trim (deg)	1.42	0.99	0.43

150T (T=1.7, LBP=35, Fn=0.555)			150T (T=1.7, LBP=35, Fn=0.694)			
	model	potential	Difference/ L_{BP} ($\times 10^2$)	model	potential	Difference/ L_{BP} ($\times 10^2$)
$T_F(m)$	1.114	1.110	0.011	0.96	1.115	-0.443
$T_A(m)$	2.319	1.984	0.957	2.252	2.025	0.649
Sinkage (m)	1.175	0.874	0.86	1.292	0.91	1.091
Trim (deg)	1.922	1.43	0.492	2.114	1.49	0.624

150T (T=1.7, LBP=35, Fn=0.833)				150T (T=1.7, LBP=35, Fn=0.888)		
	model	potential	Difference/ L _{BP} (×10 ²)	model	potential	Difference/ L _{BP} (×10 ²)
T _F (m)	0.887	1.163	-0.789	0.855	1.193	-0.966
T _A (m)	2.150	2.043	0.306	2.131	2.042	0.009
Sinkage (m)	1.263	0.88	1.094	1.276	0.849	1.22
Trim (deg)	2.068	1.44	0.628	2.088	1.39	0.698

Eco28 (T=0.46, LBP=7.124, Fn=1.538)			
	model	potential	Difference/L _{BP} (×10 ²)
T _F (m)	-0.018	0.269	-4.029
T _A (m)	0.451	0.59	-1.951
Sinkage (m)	0.469	0.321	2.077
Trim (deg)	3.77	2.58	1.19

위의 Table 16들은 각 선형별 수렴된 자세에서의 흘수와 침하량, 트림 각을 모형시험 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 선수와 선미 흘수, 침하량 및 트림 각은 모형시험 결과에서 추정된 자세의 값 차이를 각 선형의 수선간 길이(LBP)로 무차원화하여 나타내었다.

Sinkage는 선미와 선수의 흘수 차이를 말하며 트림 각은 선미트림이 양의 값이다. 선수와 선미 흘수가 모형시험 결과와 얼마나 차이 나는지와, 침하량 또한 모형 시험 결과와 그 차이를 비교하였고 트림까지 비교하여 나타내었다. 여기서 침하량의 차이가 곧 트림각의 차이와 같은 값이다.

이러한 흘수와 침하량, 트림 각에서 나타나는 오차는 항주자세 추정에 있어서 앞서 가정한 전진 방향의 힘들과 점성에 의한 힘을 배제한 자세 추정에 따른 문제로 생각되고, 또한 수치계산 상의 오차와 부양력을 정역학적 힘으로 간주하여 자세를 추정

함에 있어서 사용된 프로그램 상의 선박의 변화된 자세에서의 배수량과 부력 중심을 계산하는데 있어서 그것이 얼마나 정확한 결과를 계산하는지에 대한 고려가 필요하며 거기서 발생하는 오차에 기인한 것이라 생각된다.

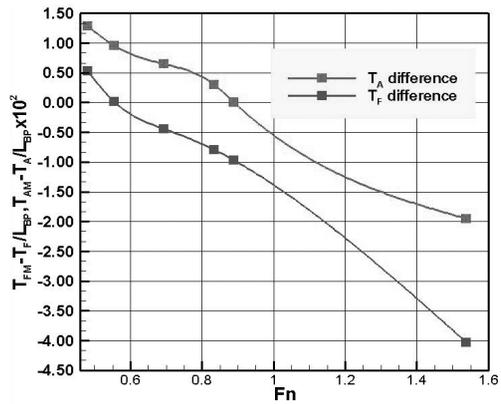


Fig. 30 Variation Draft values each of speed

Fig. 30은 모형시험과 추정자세에서의 선수·선미 흘수의 차이를 속도별로 각각의 수선간 길이로 무차원화 하여 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 T_FM, T_AM은 모형시험의 선수·미 흘수 값이다.

그림 상에서 흘수의 차이가 양의 값일 때는 모형 시험의 흘수가 더 큰 것이고 음의 값은 추정 자세의 흘수가 더 크게 나온 것이다. 그래프 상에서 선미는 Fn가 0.9 부근, 선수는 0.55 부근 이전에는 추정된 자세가 모형 시험 자세에 비해 더 부상하는 것으로 계산되었으며 그 이후에는 더 침하하는 것으로 자세가 계산되었다. 추정된 자세가 선수에서 이미 낮은 속도에서부터 작게 부상하고 있으며, 선미에선 높게 부상하는 것으로 나타났고 이는 트림 각이 모형 시험에 비해 더 작게 계산되어지기 때문으로 생각된다.

속도가 증가할수록 선수, 선미 모두 추정된

자세와 모형시험 결과와의 차이가 점점 더 크게 벌어졌다. 즉, 모형시험 결과에 비해 추정된 자세가 더 침하하는 형태로 자세가 계산이 됨을 알 수 있었다.

Fig. 31은 각 선형에서의 모형시험 결과와 추정 자세의 결과 차이 값을 침하량과 트림 두 값이 속도 별로 어떤 경향을 나타내는지 그래프로 나타낸 것이다.

트림 각의 모형시험 결과와 자세추정 값의 차이를 그래프로 나타내 보았을 때 속도가 빠른 영역의 자세추정에 있어서 상대적으로 저속의 영역보다 트림 각에 있어서 더 큰 오차를 나타내었다. 여기서 그 차이가 속도가 증가함에 따라서 거의 선형적으로 증가하는 경향이 나타났었다. 이것으로 미루어 개발된 자세추정 방법이 고속으로 갈수록 트림 각이 일정 값에 비례하여 작게 추정된다는 사실을 알 수 있었다.

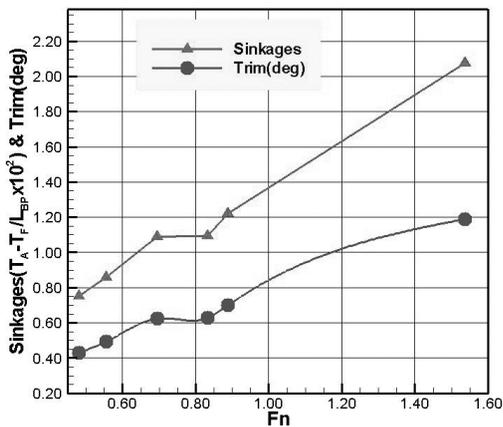


Fig. 31 Variation Trim values each of speed

4. 결 론

본 연구에서는 고속 활주선(Planing craft)에 대한 수치해석을 통해 그 항주자세 예측 및 저항

성능 평가를 수행하였다. 각각의 모형시험 자료가 잘 정리되어 있는 속도가 다른 여러 선형을 선정하여 연구를 수행하였고 그 결과를 모형시험의 그것과 비교해 보았다.

먼저 고속 활주선의 경우 항주 시 발생하는 부양력이 선체 중량의 대부분을 지지 하므로 이러한 부양력을 수치계산으로 계산해 내는 방법을 연구하였다. 항주자세의 추정에서는 포텐셜 수치해석으로 유체 동역학적 힘인 부양력을 계산해 내고 이를 정역학적인 힘으로 간주하여 부력과 선체 중량과의 힘과 트림 모멘트 평형을 이용하여 항주 자세를 추정하였다. 이러한 항주자세는 반복적인 계산 과정을 통해 보다 정확한 자세를 예측하는 방법을 사용하였다.

이상의 연구 수행으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 수치계산으로 얻어진 부양력을 흘수 변화에 따른 정역학적 힘으로 간주하여 자세 변화를 찾아내었다.
- 2) 세 선형의 항주자세를 비교해 봤을 때 모형 시험 결과와 약간의 오차가 발생하였지만 고속으로 갈수록 그 트림 각에 대한 일정한 경향을 파악할 수 있었다.
- 3) 높은 선속(F_n=1.538)을 가지는 선형의 경우 항주자세 측정의 어려움이 있었으나 선형설계에 필요한 차인의 위치를 찾아내었다.

본 논문에서 수치해석을 통한 항주자세 추정을 위해 개발된 방법을 설계 시 적용한다면 유용한 도구가 될 수 있을 것이라 생각되며 이러한 방법이 시간상의 이점도 있지만 무엇보다 경제적으로 큰 도움이 될 것이다. 하지만 선형의 저항 성능 평가에 있어서는 다양한 선형 및 속도에서의 연구가 수행

되어야 할 것이다. 이러한 항주자세 추정 법을 좀 더 다듬어 활주선의 deadrise angle 등 다양한 설계 변수에 대한 연구를 수행한다면 고속선의 설계에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) 김병남, 2011. CFD를 이용한 선체 주위의 유동 특성에 관한 연구, 박사학위 논문 : 목포대학교 대학원 선박해양공학과
- (2) Kim, D.H. Kim, W.J. & Van, S.H., 2000. Analysis of the Nonlinear Wave-Making Problem of Practical Hull Forms Using Panel Method. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 37(4), pp.1-10
- (3) Kim, D.J. Rhee, K. P. & Park, H. S., 2009. A Study on the Effects of Weight and Center of Gravity of a Planing Craft on Running Attitude. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 46(3), pp.335-342
- (4) Shin, J.I. et al., 2004. A study on Resistance Characteristics of a Leisure Boat Using unmanned High-Speed Towing Carriage. Proceedings of the Annual Autumn Meeting The Society of Naval Architects of Korea, Sancheong, pp.517-525, October 2004
- (5) Yu, J.W. & Lee, Y.G., 2008. A study on the Bow Wave Characteristics for the Resistance-Minimized Hull Form of Small Fishing Boat. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 45(2), pp.124-131
- (6) 유재훈, 1996. 판요소법을 이용한 선수 형상 설계에 관한 연구. 박사학위논문 : 서울대학교 대학원 조선해양공학과
- (7) 최정규, 2009. 고레이놀즈수 유동의 수치해석 시 벽함수 사용의 문제점 분석, 석사학위 논문, 충남대학교 대학원
- (8) Dawson, C.W., 1977. "A Practical Computer Method for solving Ship-Wave Problems", Proceedings of the 2nd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, pp. 30-38, University of California Berkeley
- (9) Douglas, S. Jenkins., 1984. Resistance Characteristics of the High Speed Transom Stern Ship R/V ATHENA in the Bare Hull Condition, DTNSRDC Report 84/024
- (10) Savitsky, Daniel, "Hydrodynamic Design of Planing Hull," MARINE TECHNOLOGY, Vol. 1, No. 1, Oct. 1964, pp. 71-95
- (11) 한국해양연구소 WAVIS 1.4 User's guide
- (12) ANSYS FLUENT 12.1.2 User's guide
- (13) 대한조선학회 선박유체역학연구회, (2009), 선박의 저항과 추진, 이승준, 조파저항(29-59), 지성사
- (14) 목포대학교 전남조선신소재기업지원센터, (2010), 유재훈, 레저보트 설계기술, 활주선 형의 이론(70-115)