



좌초 선박의 평형 자세 계산을 위한 수정된 비선형 유체 정역학적 해석 방법

김민준·함승호[†]
국립창원대학교 스마트조선모빌리티공학과

A Modified Nonlinear Hydrostatic Analysis Method for Calculating the Equilibrium Attitude of a Stranded Ship

Min-jun Kim · Seung-ho Ham[†]
Department of Smart Ocean Mobility Engineering, Changwon National University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Stranding accidents of fishing boats and commercial ships are a frequent occurrence. To minimize the loss of life and property in these accidents, a refloating plan for salvage operations is necessary. The best refloating plan is a plan for moving, adding, and removing cargo inside the stranded ship in such a way that the ground reaction force acting on the ship is minimized. To achieve this, it is necessary to quickly calculate the stranded ship to an equilibrium attitude. In this study, we derived a modified nonlinear hydrostatic analysis method for finding the static equilibrium attitude of a stranded ship by combining the effect of ground reaction force. We introduced coordinate transformation matrix between ship coordinate and reaction force coordinate to modify the equation. The procedure of finding the equilibrium position of a stranded ship is also proposed. Finally, when the barge and VLCC were stranded, the equilibrium attitude could be successfully calculated by changing the stranding point.

Keywords : Stranded ship(좌초선), Refloating(이초), Ground reaction force(지면반력), Static equilibrium(정적 평형), Coordinate transformation matrix(좌표 변환 행렬)

1. 서론

해상에서 수심의 급격한 변화 또는 주변 해역 특성에 대한 선원들의 무지, 운전 미숙 등으로 인해 선박이 암초나 장애물에 걸려 움직이지 못하고 선박의 일부가 수면 위로 드러나거나 Fig. 1처럼 파손으로 인해 주변 자연환경에 막대한 피해를 주는 사고들이 꾸준히 발생하고 있다.

이처럼 좌초된 선박이 파손되면 인명 및 재산 피해뿐만 아니라 자연피해와 같은 이차적인 피해까지 초래하게 된다. 이를 막기 위해서는 Fig. 2와 같이 좌초선을 맞닿은 지면 또는 암초로부터 안전한 수역으로 인양하는 이초 작업을 해야 한다. 자력 이초 여부를 확인한 후 자력 이초가 힘들 경우 타 선박(구난선)을 이용하여 이초 작업을 시도한다. 이때 자력 이초의 경우 가장 중요한 것은 선박의 중량을 경감하여 선체를 부상시키는 것이다.

좌초된 선박에는 기존 선박에 작용하는 힘인 부력과 중력 이외에도 선박과 맞닿은 암초나 지면에서 발생하는 힘인 지면반력이

작용한다. 이초 작업을 위해서는 선박 스스로 부양하거나 선박에 작용하는 지면반력의 크기를 최소화해야 한다. 지면반력의 크기를 최소화하기 위해서는 선박 내부의 화물을 이동, 제거 또는 외부에서 화물을 추가하는 등 이초 계획의 수립이 필요하다 (Varsami et al., 2012). 해외에서는 좌초된 선박의 이초를 위한 프로그램

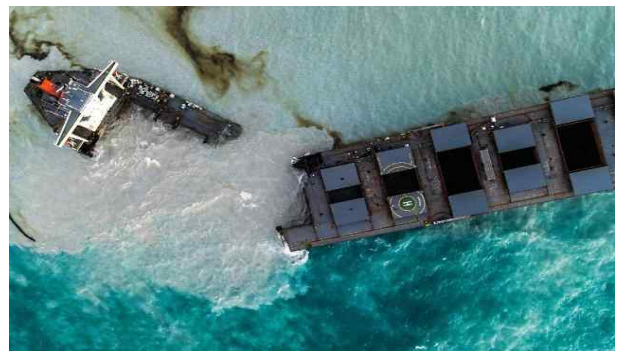


Fig. 1 Wakashio stranded in Mauritius



Fig. 2 Stranding of general cargo vessel Lysblink Seaways

으로 Hebert-ABS 사의 HECSALV 프로그램과 이를 미군에 적합하게 변형한 POSSE 프로그램을 사용하고 있다. 하지만 이러한 해외의 이초 프로그램들은 단위를 피트 단위계를 사용하고 국내 군함 및 선박 모델을 제공하지 않으며 국내 전문가의 부재로 기술 지원을 받을 수 없어 도입에 큰 비용이 발생하는 문제가 있다. 최근 국내 연안 등에서 어선들의 좌초 사고가 잦음을 고려할 때 국내에 이초 프로그램 적용이 시급하다.

이초 프로그램의 개발을 위해서는 좌초선에 작용하는 힘과 이에 따른 평형 자세를 계산할 수 있어야 한다. 평형 자세 계산 기능은 이초 전, 이초 시, 이초 후 인양작업 시 모두 활용이 가능하다. 하지만 주로 이초 전 계획 수립 단계에서 활용도가 가장 높을 것으로 판단된다. Lee and Ham (2021)의 연구에서는 좌초 선박에 작용하는 힘과 모멘트의 평형 방정식에서 반복 계산을 통해 선박의 자세와 좌초 지점을 찾았다. 이러한 방법은 불필요한 계산이 많고 2차원에만 적용한 한계가 있었다. 또한, 좌초선은 기존의 선박에 작용하는 힘 외에도 지면반력이 존재하고 좌초 지점을 기준으로 자세가 변화하는 특성이 있어 기존의 비선형 유체정역학 해석 방법 (Park et al., 2018)으로는 평형 자세를 구할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 지면반력과 좌초 지점을 고려하여 수정된 비선형 유체정역학적 해석 방법을 도출하였다.

2. 수정된 비선형 유체 정역학적 해석 방법

2.1 좌초선에 작용하는 힘

기존의 선박과 달리 좌초선은 중력(F_G)과 부력(F_B) 이외에도 좌초선이 맞닿은 지면에서 발생하는 지면반력(F_R) 작용한다. 지면반력(F_R)의 크기는 선박이 좌초되면서 선박의 일부가 수면 밖으로 드러나면서 발생한 부력(F_B)의 손실분과 같다. 선박에 작용하는 힘의 분포는 Fig. 3과 같으며 중력(F_G), 부력(F_B), 지면반력(F_R) 작용점의 위치는 r_G, r_B, r_R 로 표기한다.

선박이 평형을 유지하려면 선박에 작용하는 힘과 모멘트가 평형을 이루어야 한다 (Beer et al., 2016). 좌초선은 기존의 선박과

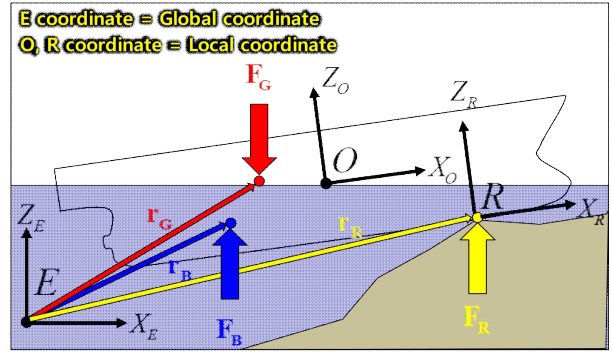


Fig. 3 Forces and position vectors on a stranded ship

달리 지면반력을 추가로 고려하여 힘 평형 방정식 (식 (1))과 모멘트 평형 방정식 (식 (2))을 만족하여야 한다.

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_R = 0 \quad (1)$$

$$\sum \mathbf{M} = \mathbf{r}_G \times \mathbf{F}_G + \mathbf{r}_B \times \mathbf{F}_B + \mathbf{r}_R \times \mathbf{F}_R = 0 \quad (2)$$

지면반력과 마찰계수(μ)를 통해 이초에 필요한 힘, 이초력 (Freeing Force: \mathbf{F}_{Free})을 구할 수 있다 (Naval Sea systems command., 2021). 좌초선의 이초력의 크기는 식 (3)과 같다.

$$\mathbf{F}_{Free} = 1.12\mu\mathbf{F}_R \quad (3)$$

즉, 이초력을 최소로 하기 위해서는 선박 내에 있는 화물의 이동, 제거를 통해 식 (1), (2)를 만족하는 자세를 찾고, 이에 따라 지면반력이 최소가 되도록 해야 한다.

2.2 비선형 유체 정역학적 해석 방법

비선형 유체 정역학적 해석 방법 (Park et al., 2018)은 선박에 작용하는 힘과 모멘트의 크기와 immersion, heel, trim에 의한 미소 변화량을 통해 선박 자세의 미소 변화량($\delta z, \delta \phi, \delta \theta$)을 구하고 이를 반복하여 최종적으로 선박의 평형 자세를 계산하는 방법이다. 식 (4)는 선박의 immersion, heel, trim의 미소 변화량으로 인한 중력과 부력의 변화량과 선박에 작용하는 힘(\mathbf{F})과 모멘트($\mathbf{M}_T, \mathbf{M}_L$)의 관계식(식 (4))을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{F} \\ -\mathbf{M}_T \\ -\mathbf{M}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_B}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{F}_G}{\partial z} & \frac{\partial \mathbf{F}_B}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{F}_G}{\partial \phi} & \frac{\partial \mathbf{F}_B}{\partial \theta} + \frac{\partial \mathbf{F}_G}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \mathbf{M}_{B,T}}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{M}_{G,T}}{\partial z} & \frac{\partial \mathbf{M}_{B,T}}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{M}_{G,T}}{\partial \phi} & \frac{\partial \mathbf{M}_{B,T}}{\partial \theta} + \frac{\partial \mathbf{M}_{G,T}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \mathbf{M}_{B,L}}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{M}_{G,L}}{\partial z} & \frac{\partial \mathbf{M}_{B,L}}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{M}_{G,L}}{\partial \phi} & \frac{\partial \mathbf{M}_{B,L}}{\partial \theta} + \frac{\partial \mathbf{M}_{G,L}}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta z \\ \delta \phi \\ \delta \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

좌초선의 경우 기존 선박과 달리 지면반력이 작용하고 자세 변화도 지면반력의 작용점을 기준으로 하기에 기존의 비선형 유체 정역학적 해석 방법을 수정하여야 한다. 우선 좌초선에 대한 적용 이전에 식을 간략화한다. 이 방법은 선박의 자세는 미소한

Table 1 Abbreviation of equation (6)

Item	Abbreviation
Area of waterplane	A_{WP}
Center of A_{WP}	(x_F, y_F)
Depth of initial F_B, F_G	z_{B_0}, z_{G_0}
Displacement	∇
2 nd moment of A_{WP}	I_T, I_L
z_{B_0} Moment of inertia of A_{WP}	I_P

변화량을 가지기에 중력에 의한 힘의 크기는 immersion, heel, trim의 미소 변화량에 의한 변화가 없으며 중력에 의한 Transverse, Longitudinal Moment($\mathbf{M}_{G,T}, \mathbf{M}_{G,L}$)는 immersion의 미소 변화량(δz)에 의한 변화가 없다. 마찬가지로 미소한 자세 변화이므로 중력에 의한 Transverse, Longitudinal Moment는 각각 trim의 미소 변화량($\delta\theta$), heel의 미소 변화량($\delta\phi$)에 의한 변화가 없다. 간략화된 식은 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{F} \\ -\mathbf{M}_T \\ -\mathbf{M}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_B}{\partial z} & \frac{\partial \mathbf{F}_B}{\partial \phi} & \frac{\partial \mathbf{F}_B}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \mathbf{M}_{B,T}}{\partial z} & \frac{\partial \mathbf{M}_{B,T}}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{M}_{G,T}}{\partial \phi} & \frac{\partial \mathbf{M}_{B,T}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \mathbf{M}_{B,L}}{\partial z} & \frac{\partial \mathbf{M}_{B,L}}{\partial \phi} & \frac{\partial \mathbf{M}_{B,L}}{\partial \theta} + \frac{\partial \mathbf{M}_{G,L}}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta z \\ \delta \phi \\ \delta \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)의 미분항을 수식으로 나타내면 식 (6)과 같다. 미분항을 \mathbf{D} 로 표기하며 유도 과정은 Park et al. (2018)을 참고한다.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -\rho g A_{WP} & -\rho g A_{WP} \cdot y_F & \rho g A_{WP} \cdot x_F \\ -\rho g A_{WP} \cdot y_F & -\rho g (z_{B_0} \nabla + I_T) - z_{G_0} \mathbf{F}_G & \rho g I_P \\ \rho g A_{WP} \cdot x_F & \rho g I_P & -\rho g (z_{B_0} \nabla + I_L) - z_{G_0} \mathbf{F}_G \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)에 쓰인 변수는 Table 1과 같다.

한편, 비선형 유체정역학적 해석 방법을 좌초선의 평형 자세 계산을 위해 수정하려면 Fig. 3에 표시된 좌초선의 자세 변화량의 기준점인 R 에 대한 고려가 필요하다.

2.3 좌초선 자세의 회전 기준점에 대한 고려

좌초선은 일반 선박과 달리 LCF 기준의 회전이 아닌 좌초된 위치, 즉 지면반력(\mathbf{F}_R)의 작용점을 기준으로 회전한다. 회전의 기준점이 변하면, roll과 trim에 의한 각도는 그대로 유지되나 immersion은 변환된다. 즉, heel, trim에 의한 변화량($\delta\phi_O, \delta\theta_O$)은 기준과 같으나 immersion에 의한 미소 변화량(δz_O)은 변환이 필요하다. 여기서 $\delta z_O, \delta\phi_O, \delta\theta_O$ 는 O coordinate에서의 변화량을 의미한다. 일반적으로 회전하는 물체에서 한 위치의 속력은 각속도와 회전하는 물체의 원점에서 해당 위치까지의 위치 벡터는 외적으로 표현된다. 좌초선은 Fig.3의 R 을 중심으로 회전하므로, 점 R 을 기준으로 O 점의 속도는 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} {}^E \dot{\mathbf{r}}_{O/R} &= \boldsymbol{\omega} \times {}^E \mathbf{r}_{O/R} \\ &= -{}^E \mathbf{r}_{O/R} \times \boldsymbol{\omega} \\ &= -{}^E \tilde{\mathbf{r}}_{O/R} \cdot \boldsymbol{\omega} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 ${}^E \mathbf{r}_{O/R}$ 은 점 R 에서 점 O 까지의 벡터, ${}^E \tilde{\mathbf{r}}_{O/R}$ 는 skew-symmetric 행렬로 벡터의 외적을 행렬로 표현할 때 사용된다 (Blundell and Harty, 2004). 식 (7)을 풀어쓰면 식 (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{O/R} \\ \dot{y}_{O/R} \\ \dot{z}_{O/R} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)에서 각속도는 일반적으로 roll(ϕ), pitch(θ), yaw(ψ)에 해당하는 각도의 변화율과 같지 않다. 따라서 식 (9)와 같은 변환식이 사용된다 (Shabana et al., 1994).

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi \cos\theta & \cos\psi & 0 \\ -\sin\theta & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (9)를 식 (8)에 대입하여 정리하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{O/R} \\ \dot{y}_{O/R} \\ \dot{z}_{O/R} \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \\ &= - \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi \cos\theta & \cos\psi & 0 \\ -\sin\theta & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} z \sin\psi \sin\theta + y \sin\theta & z \cos\psi & -y \\ -z \cos\psi \cos\theta - x \sin\theta & z \sin\psi & x \\ y \cos\psi \cos\theta - x \sin\psi \cos\theta - y \sin\psi - x \cos\psi & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 x, y 와 yaw의 속도 성분은 평형 자세 계산에 필요한 항목이 아니므로, 식에서 제외하고, Yaw angle ψ 에는 0을 대입하여 식 z 대한 속도 성분만 표시하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_{O/R} \end{bmatrix} = [y \cos\theta - x] \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (11)에서 미분항을 미소 변화량으로 치환하고, δz 에 관한 항을 이용하면 기존의 비선형 유체 정역학적 해석 방법의 immersion, heel, trim에 의한 미소 변화량($\delta z_O, \delta\phi_O, \delta\theta_O$)과 좌초선의 지면반력(\mathbf{F}_R)의 작용점에서의 heel과 trim에 의한 미소 변화량($\delta\phi_R, \delta\theta_R$)과의 관계식 (12)를 도출할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \delta z_O \\ \delta\phi_O \\ \delta\theta_O \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \cos\theta & -x \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\phi_R \\ \delta\theta_R \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \delta\phi_R \\ \delta\theta_R \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (12)를 통해 선박의 원점을 기점으로 하는 O-coordinate 상에서의 자세 변화량과 지면반력의 작용점을 기준으로 하는 R coordinate 상에서의 자세 변화량의 변환행렬 \mathbf{J} 를 구할 수 있다.

2.4 좌초선의 자세 미소 변화량 계산 방법

기존의 비선형 유체 정역학적 해석 방법은 힘과 모멘트를 선박 자세의 미소 변화량과의 관계식을 이용하여 힘과 모멘트의 크기로 선박 자세의 미소 변화량을 구하는 공식을 도출한 것이다. 이처럼 지면반력과 좌초점에서 회전을 고려하여 관계식 식 (12)를 이용해 비선형 유체정역학적 해석 방법(식 (5))의 선박의 자세 변화량을 R coordinate 상에서의 변화량으로 변환한다. 변환된 식은 식 (13)과 같다.

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{F} \\ -\mathbf{M}_T \\ -\mathbf{M}_L \end{bmatrix} = \mathbf{D}\mathbf{J} \begin{bmatrix} \delta\phi_R \\ \delta\theta_R \end{bmatrix} \quad (13)$$

좌초선의 자세 변화량은 변환 행렬 \mathbf{J} 를 이용하여 R coordinate 상의 값으로 나타나 있으나 좌초선에 작용하는 힘과 모멘트는 O coordinate 상의 값으로 표기되어 있어 식이 수정될 필요가 있다. 이를 R coordinate 상에서의 값으로 바꾸기 위해 좌우 번에 전치 행렬 \mathbf{J}^T 를 곱해주어 식의 내부 값들을 모두 R coordinate의 값으로 변환시킨다. 이를 통해 좌초선의 평형 자세를 구하는 수정된 비선형 유체정역학적 해석 방법을 도출한다(식 (14)).

$$\mathbf{J}^T \begin{bmatrix} -\mathbf{F} \\ -\mathbf{M}_T \\ -\mathbf{M}_L \end{bmatrix} = \mathbf{J}^T \mathbf{D}\mathbf{J} \begin{bmatrix} \delta\phi_R \\ \delta\theta_R \end{bmatrix} \quad (14)$$

식 (14)를 통해 좌초선의 자세 변화의 기준점인 R coordinate 상에서의 힘과 자세의 관계식을 구하였다. 본 연구는 좌초선에 작용하는 힘과 모멘트의 크기가 주어졌을 때 좌초선 자세의 미소 변화량을 계산하기 때문에 식 (14)의 우변 $\mathbf{J}^T \mathbf{D}\mathbf{J}$ 의 역행렬을 양변에 곱하여 좌초선의 회전 기준점 R에서의 미소 변화량을 구하는 식으로 수정하면 식 (15)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \delta\phi_R \\ \delta\theta_R \end{bmatrix} = (\mathbf{J}^T \mathbf{D}\mathbf{J})^{-1} \times \left(\mathbf{J}^T \begin{bmatrix} -\mathbf{F} \\ -\mathbf{M}_T \\ -\mathbf{M}_L \end{bmatrix} \right) \quad (15)$$

식 (15)를 통해 좌초선에 작용하는 힘과 모멘트에 따라 좌초선 자세의 미소 변화량을 구할 수 있다. 이를 이용하여 좌초선이 정적 평형 상태일 때의 자세를 찾기 위해서는 Fig. 4과 같은 과정을 거쳐야 한다.

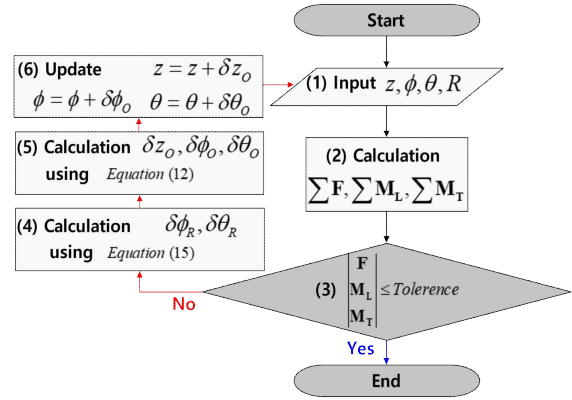


Fig. 4 The procedure of finding the equilibrium position of a stranded ship

Fig. 4 순서도의 각 단계에 대한 설명은 다음과 같다.

(1) 입력 단계: 초기 또는 현재 좌초선의 자세, immersion, trim, heel 각도와 지면반력의 작용점을 입력받는다.

(2) 힘과 모멘트 계산 단계: (1) 단계에서 입력받은 값을 통해 좌초선에 작용하는 힘과 모멘트를 계산한다.

(3) 평형 자세 판단 단계: (2) 단계에서 계산된 힘과 모멘트의 크기와 임계값을 비교하여 좌초선이 평형 자세에 도달하였는지를 판별한다. 계산값이 임계값 이하면 평형 자세에 도달하였다고 판단하여 계산을 종료하고, 임계값보다 크면 평형 자세에 도달하지 못하였다고 판단하여 (4) 단계로 이동한다.

(4) 좌초선 미소 변화량 계산 단계: 수정된 비선형 유체정역학적 해석 방법(식 (15))을 통해 R을 기준으로 한 좌초선 자세의 미소 변화량($\delta\phi_R, \delta\theta_R$)을 계산한다.

(5) O coordinate에서의 자세 변화량 변환 단계: 식 (12)를 통해 O coordinate 상에서의 좌초선의 자세 변화량을 구한다.

(6) 자세 업데이트 단계: (5) 단계에서 계산된 변화량을 기존의 자세에 더해 선박의 자세를 업데이트한 뒤 (1) 단계부터 다시 시작하여 선박이 평형 자세에 도달할 때까지 반복한다.

본 연구를 통해 좌초선에 적용할 수 있는 수정된 비선형 유체 정역학적 해석 방법을 도출하고 Fig. 4의 과정을 통해 좌초선의 평형 자세를 빠르게 계산할 수 있다. 이어지는 장에서는 2장에서 도출한 좌초선의 평형 자세를 계산하는 수정된 비선형 유체정역학적 해석 방법을 여러 예제에 적용하여 식을 검증한다.

3. 적용

3.1 좌초선의 평형 자세 계산 프로그램

2장을 통해 도출한 수정된 비선형 유체정역학적 해석 방법을 검증하기 위해서는 복잡한 수학적 계산을 반복해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 C#과 Eyeshot 라이브러리를 활용하여 다음과 같은 프로그램을 개발하였다(Fig. 5).

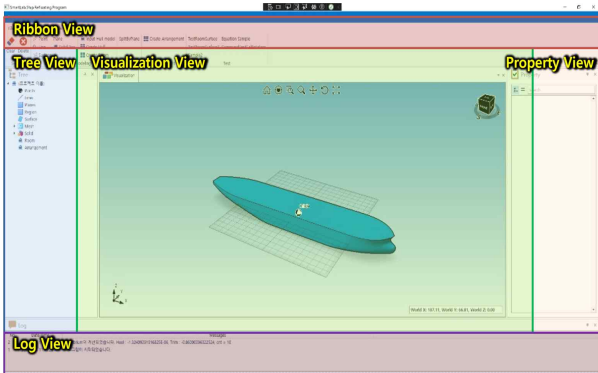


Fig. 5 Equilibrium calculation program of a stranded ship

개발된 프로그램은 검증에 사용될 모델의 형상과 자세를 시각화하고 본 연구에서 제안한 Fig. 4의 순서도에 따라 모델에 작용하는 힘의 작용점과 모델의 초기 자세를 입력받아 수정된 비선형 유체정역학적 해석 방법을 통해 좌초선의 평형 자세를 도출한다. 이어지는 장에서의 모든 검증은 위 프로그램을 통해 진행된다.

3.2 직사각형 바지선에 대한 적용

3.2장에서는 예제를 통해 수정된 비선형 유체 정역학적 해석 방법을 적용하여 좌초선의 정적 평형 자세를 찾아본다. 검증에 사용된 직사각형 바지선의 이미지와 제원은 Fig. 6 및 Table 2와 같다.

첫 번째 예제는 선박에 trim만 발생하도록 초기 조건을 입력하였다. 바지선에 작용하는 초기 힘과 모멘트를 계산하면 Table 3와 같다.

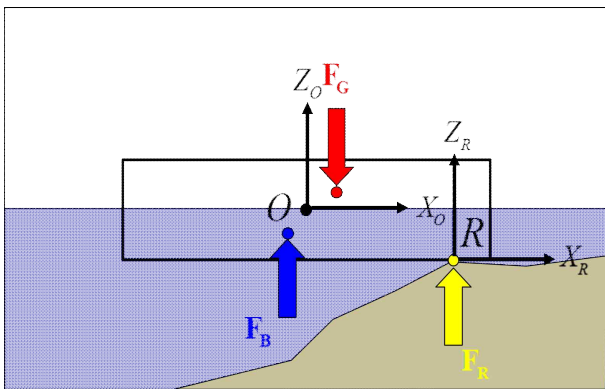


Fig. 6 A stranded barge

Table 2 Specification of a stranded barge

Item	Value	Item	Value
Length	100 m	Displacement	20,000 ton
Breath	30 m	Center of mass	(5, 0, 2)
Depth	10 m	Tolerance	1
Origin of O coordinate	(0, 0, 0)	Ground reaction point(R)	(30, 0, -5)

Table 3 Forces/moments and points on initial condition

Item	Value	Point
F_G	20,000 ton	(5, 0, 2)
F_B	15,409 ton	(0, 0, -2.5)
F_R	4,590 ton	(30, 0, -5)
$M_{G,L}$	100,000 ton · m	-
$M_{B,L}$	0	-
$M_{R,L}$	137,715 ton · m	-

계산된 힘과 모멘트의 크기를 Fig. 4의 (3) 단계에 대입하여 임계값과 비교하면 식 (16)과 같다.

$$\begin{bmatrix} F \\ M_T \\ M_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_B + F_R - F_G \\ M_{B,T} + M_{R,T} - M_{G,T} \\ M_{B,L} + M_{R,L} - M_{G,L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 37715 \end{bmatrix} \geq tol \quad (16)$$

힘과 모멘트의 크기가 임계값인 1보다 크기 때문에 좌초선은 평형 자세가 아니다. 따라서, Fig. 4의 (4) 단계를 통해 좌초선 자세 변화량($\delta\phi_R, \delta\theta_R$)을 계산한다. 식 (15)의 변수와 계산된 변화량은 Table 4와 같다.

좌초선의 자세 변화량을 기존의 좌초선에 변화량을 더한 후 식 (16)이 Tolerance 이하의 값을 가질 때까지 반복한다. 본 예제에서는 5번의 반복 시행 후 평형 자세에 도달하였다(Fig. 7).

좌초선의 평형 자세와 좌초선에 작용하는 힘의 크기, 작용점은 Table 5와 같다.

Table 4 Calculation results of 1st iteration

Item	Value	Item	Value
$(\delta\phi_R, \delta\theta_R)$	(0, 0.007 deg)	z_{B_0}	2.5
A_{WP}	3,000 m ²	z_{G_0}	2
(x_O, y_O)	(0, 0)	I_T	225,000
(x_R, y_R)	(30, 0)	I_L	2,500,000
∇	15,000 m ³	I_P	0

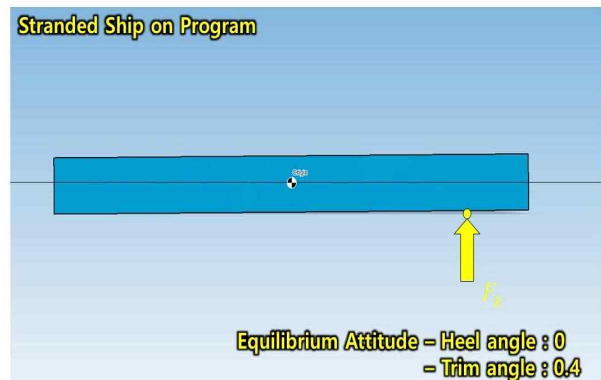


Fig. 7 Equilibrium attitude of the stranded barge

Table 5 Forces and points on equilibrium attitude

Item	Value	Point
$(\delta\phi_R, \delta\theta_R)$	(0, 0.4 deg)	-
F_G	20,000 ton	(4.9, 0, 1.8)
F_B	16,074 ton	(-1.1, 0, -2.6)
F_R	3,925 ton	(30, 0, -5)

Table 6 Forces/moments and points on initial condition

Item	Value	Point
F_G	20,000 ton	(5, 0, 2)
F_B	15,409 ton	(0, 0, -2.5)
F_R	4,590 ton	(30, -2, -5)
$M_{G,L}$	100,000 ton · m	-
$M_{R,T}$	-9,181 ton · m	-
$M_{R,L}$	137,715 ton · m	-

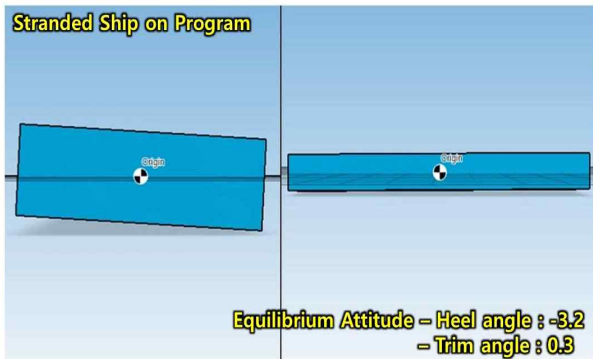


Fig. 8 Equilibrium attitude of the stranded barge

Table 7 Forces and points on equilibrium attitude

Item	Value	Point
$(\delta\phi_R, \delta\theta_R)$	(-3.2 deg, 0.3 deg)	-
F_G	20,000 ton	(4.9, -0.3, 1.7)
F_B	16,247 ton	(-0.8, -0.9, -2.6)
F_R	3,752 ton	(30, -2, -5)

두 번째로 지면반력의 작용점을 달리하여 Table 6과 같은 초기 상태에서 동일한 비지선의 평형 자세를 계산하였다. 이번에는 trim과 heel이 동시에 발생하도록 설정하였다. 계산 결과 20번의 반복 시행 후 최종 평형 자세를 구하였다. 이때의 자세는 Fig. 8과 같고 작용하는 힘과 작용점의 위치는 Table 7과 같다.

이상 비지선에 대한 평형 자세 계산을 수행하였다. Trim만 발생하는 경우보다 Heel과 Trim이 동시에 발생하는 경우 반복 횟수가 훨씬 더 많이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Trim이 수정되면 Heel에서 오차가 발생하고, 거꾸로 Heel이 수정되면 다시 Trim에서 오차가 발생하는 상관관계가 있기 때문이다. 반복 횟수

가 증가하면 계산 시간도 이에 비례하여 늘어나게 되지만, 본 연구에서 제안한 평형 자세 계산 방법으로 실행 시 5회나 20회는 모두 1초 이내로 큰 차이가 없었다.

3.3 실제 선박에 대한 적용

3.3장에서는 직사각형 비지선과 같은 간단한 예시가 아니라 실제 선박에서도 본 연구에서 제안한 수정된 비선형 유체정역학적 해석 방법이 적용이 가능한지 검증한다. 본 연구는 320K VLCC를 대상으로 하였다(Fig. 9). Trim만 발생하도록 한 case 1과 heel과 trim이 동시에 발생하는 case 2, 좌초 지점을 선미로 설정한 case 3 순으로 검증을 진행한다. 모든 case 들의 초기 자세는 trim과 heel 각도가 0이며 검증에 사용된 모델과 지면반력의 제원은 Table 8과 같다.

$$\begin{bmatrix} F \\ M_T \\ M_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3,888,810 \end{bmatrix} \geq tol \quad (17)$$

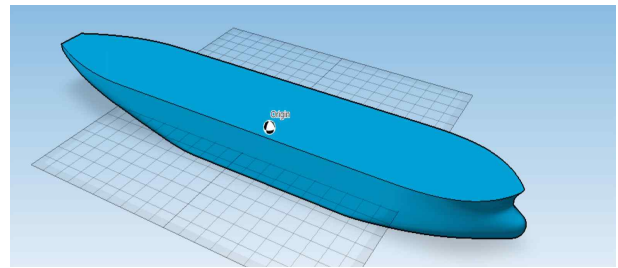


Fig. 9 3D model of 320K VLCC

Table 8 Specification of 320K VLCC

Item	Value	Item	Value
Length	300 m	Displacement	320,000 ton
Breadth	54 m	Center of mass	(20, 0, 5)
Depth	10 m	Tolerance	1
Origin of O coordinate	(0, 0, 0)	Ground reaction point(R)	(90, 0, -15)

Table 8의 제원을 기준으로 한 계산 결과는 Table 9와 같다. 식 (17)과 같이 계산 결과가 평형 자세가 아니므로 새로운 자세 계산을 수행한다. 계산 결과는 Table 10에 정리하였다.

Table 9 Force and point on initial attitude of case 1

Item	Value	Point
F_G	320,000 ton	(20, 0, 5)
F_B	224,317 ton	(7.4, 0, -7.2)
F_R	95,683 ton	(90, 0, -15)
$M_{G,L}$	6,400,000 ton · m	-
$M_{B,L}$	1,669,445 ton · m	-
$M_{R,L}$	8,611,436 ton · m	-

Table 10 Calculation results of 1st iteration of VLCC

Item	Value	Item	Value
$(\delta\phi_R, \delta\theta_R)$	(0, 0.016)	z_{B_0}	7.2
A_{WP}	16,017	z_{G_0}	5
(x_F, y_F)	(0.28, 0)	I_T	4,026,532
(x_R, y_R)	(90, 0)	I_L	105,830,806
∇	218,356	I_P	-0.3

Table 11 Forces and points on equilibrium attitude of case 1

Item	Value	Point
$(\delta\phi_R, \delta\theta_R)$	(0, 0.8 deg)	-
F_G	320,000 ton	(19.7, 0, 3.9)
F_B	247,880 ton	(-0.7, 0, -7.7)
F_R	72,120 ton	(90, 0, -15)

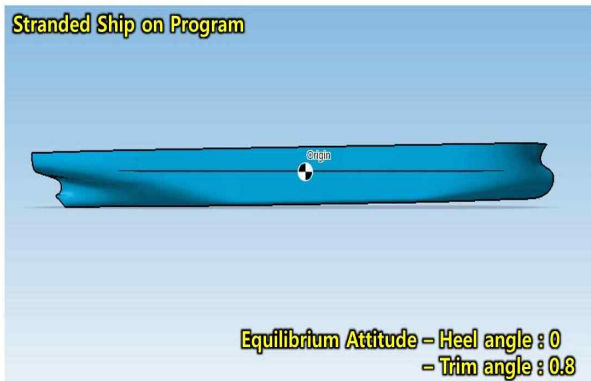


Fig. 10 Equilibrium attitude of case 1

Table 12 Initial force, point and moments of case 2

Item	Value	Point
F_R	95,683 ton	(20, 1, -15)
$M_{R,T}$	95,683 ton · m	-
$M_{R,L}$	8,611,470 ton · m	-

계산된 자세의 변화량은 Fig. 4의 (5) 단계, 식 (11)을 통해 O coordinate 상에서의 값으로 변환하고 (6) 단계, 기존의 변화량에 더하여 값을 업데이트하고 좌초선에 작용하는 힘과 모멘트의 크기가 임계값 이하가 될 때까지 계산을 반복한다. Case 1의 예제는 5번의 시행 만에 평형 자세에 도달하였다. 평형 자세, 최종 힘과 모멘트, 힘의 작용점은 Table 11에 정리하였고, 평형 자세는 Fig. 10과 같다.

Case 2에서는 trim과 heel이 동시에 발생할 때 좌초선의 평형 자세를 도출할 수 있는지 검토한다. 이를 위해서 기존의 모델과 같은 환경에서 Table 12와 같이 지면반력의 작용점과 모멘트를 변경한다.

Case 2는 74번의 시행 만에 평형 자세에 도달하였다. 평형 자세, 최종 힘과 모멘트, 힘의 작용점은 Table 13에 정리하였고, 평형 자세는 Fig. 11과 같다.

Table 13 Forces and points on equilibrium attitude of case 2

Item	Value	Point
$(\delta\phi_R, \delta\theta_R)$	(23.02 deg, 0.49 deg)	-
F_G	320,000 ton	(19.9, -7, 2.5)
F_B	261,159 ton	(-7.7, -9.5, -8.9)
F_R	58,841 ton	(90, 0, -15)

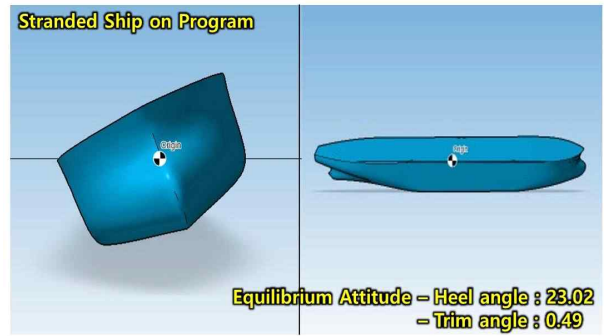


Fig. 11 Equilibrium attitude of case 2

Table 14 Initial force, point and moments of case 3

Item	Value	Point
F_R	95,683 ton	(-50, 2, -15)
$M_{R,T}$	191,366 ton · m	-
$M_{R,L}$	4,784,150 ton · m	-

Table 15 Forces and points on equilibrium attitude of case 3

Item	Value	Point
$(\delta\phi_R, \delta\theta_R)$	(20.49 deg, -2.37 deg)	-
F_G	320,000 ton	(20.7, -6.8, 0.1)
F_B	292,480 ton	(25.3, -7.5, -10.2)
F_R	19,520 ton	(-50, 2, -15)

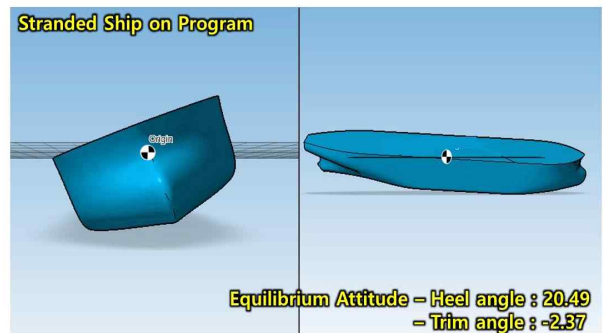


Fig. 12 Equilibrium attitude of case 3

Case 3에서는 좌초 지점의 위치를 Table 14와 같이 선미에 두었다.

Case 3은 69번의 시행만에 평형 자세에 도달하였다. 평형 자세, 최종 힘과 모멘트, 힘의 작용점은 Table 15에 정리하였고, 평형 자세는 Fig. 12과 같다.

4. 결론

본 연구를 통하여 선박의 평형 자세를 구하는 기존의 비선형 유체정역학적 해석 방법을 좌초선에 적용하기 위해 지면반력의 작용점을 기준으로 수정된 비선형 유체정역학적 해석 방법을 도출하였다. 수정된 해석식을 활용하여 좌초선의 평형 자세를 계산하기 위한 절차를 제안하였고, 이를 활용하여 좌초선의 평형 자세 계산 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서 제안한 비선형 유체정역학적 해석 방법을 사용하여 비자선과 VLCC의 좌초 지점을 바꿔가며 빠른 시간에 평형 자세를 계산할 수 있음을 확인하였다.

향후 연구로 본 연구에서 개발한 평형 자세 계산 모듈을 활용하여 이차 계획 수립을 위한 이차 프로그램을 개발할 계획이며 지면반력의 작용점을 여러 지점 또는 면으로 확장하여 좌초선의 자세 계산에도 적용할 수 있도록 식을 수정할 계획이다.

후 기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 (No. 2019R1G1A1100187), 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학연협력 선도대학 육성사업 (LINC 3.0), 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0017006, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)의 연구결과임을 밝히며 이에 감사 드립니다.

References

Beer, F.P., Johnston, Jr. E.R. and Mazurek, D.F., 2016. *Vector Mechanics for engineers: static*, McGraw-Hill Education Korea, Ltd, Inc.

Blundell, M. and Harty, D., 2004. *The multibody systems approach to vehicle dynamics*. Elsevier, Inc
Eyeshot, URL: <https://www.devdept.com/products/eyeshot> [Accessed 26 August 2024]
HECSALV, URL: <https://www.herbert-abs.com/hecsalv> [Accessed 26 August 2024]
Lee, W.Y. and Ham, S.H., 2021. A calculation method of the ship's posture based on the static equilibrium for the refloating plan of the stranded ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 59(1), pp.55-63.
Naval Sea systems command, 2021. *U.S. Navy sailor's handbook*, Naval Sea systems command, Inc
Park, K.P., Cha, J.H. and Ku, N., 2018. Nonlinear hydrostatic analysis of the floating structure considering the large angle of inclination. *Journal of Marine Science and Technology*, 26(2), pp.14.
Shabana, A.A., 1994. *Computational Dynamics*, John Wiley & Sons, Inc
Varsami, A.E., Chircor, M., Popescu, C. and Hanzu-Pazara, R., 2012. Refloating a ship using her own means. proceedings of the 23rd international Daaam symposium, pp.0263-0266.



김민준

함승호