

고속으로 입수하는 물체의 입수 거동 해석

Numerical Analysis of Water Entry Behavior of the High Speed

○ 김영우¹⁾, 박원규²⁾, 김찬수³⁾
Y. W. Kim, W. G. Park and C. S. Kim

The numerical methodology for simulating water entry behaviors of the high-speed bodies has been developed. Since the present method assumed the impact occurs within a very short time interval, the viscous effects do not have enough time to play a significant role in the impact forces, that is, the flow around a water-entry object was assumed as an incompressible potential flow and is solved by the source panel method. The elements fully submerged into the water are routinely treated, but the elements intersected by the effective planar free surface are redefined and reorganized to be amenable to the source panel method. To validate the present code, it has been applied to the ogive model and compared with experimental data. Good agreement has been obtained. The water entry behavior of the bouncing phenomena from the free surface has been also simulated using the impact forces and two degree of freedom dynamic equation. Physically, acceptable results have been obtained.

1. 서 론

고속으로 입수하는 입수체의 거동은 유체에 잠겨서 운동하는 물체에 비해 상당히 다른 특성을 지니고 있다. 특히 입수체의 입수각도가 작은 경우에는 입수시 발생하는 강한 충격 모멘트의 영향으로 물체가 목표하는 지점에 입수하지 못하고 수면 밖으로 튕겨져 나가는 바운싱 현상이 발생할 수 있기 때문에 이 경우 정확한 입수 거동이 해석되어야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 임의의 형상을 가진 물체가 작은 입수 각도를 가지고 입수하는 경우의 거동 변화를 해석함으로써 입수체의 발사 기준을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다. 고속으로 물체가 입수하는 경우 거동 변화를 초래하는 입수 충격은 짧은 시간 내에 발생하므로 본 연구에서는 입수체 주위의 유동을 포텐셜 유동으로 가정하여 계산을 수행하였다. 이러한 가정은 정지해 있는 물체가 갑자기 움직이는 경우에 이 물체 주위의 유동이 아주 짧은 시간동안 포텐셜 유동이라는 사실에 근거하여 타당성을 가질 수 있다. 한편 이러한 3차원 포텐셜 유동장을 해석하기 위한 수치적 기법으로는 Hess와 Smith[1]에 의해 제안된 소스 패널 기법(Source Panel Method)을 사용하였는데, 이 방법은 현재 항공·조선·기계 분야 등에서 널리 적용되고 있다.

2. 지배방정식과 경계조건

고속으로 입수하는 물체의 충격량을 계산하기 위해 물체 주위의 유동을 비압축성 포텐셜 유동으로 가정하면, 지배방정식과 경계조건은 다음과 같이 나타난다.

1 학생회원, 부산대학교 대학원 기계공학과
2 정회원, 부산대학교 기계공학부
3 국방 과학 연구소 (진해)

지배방정식: $\nabla^2 \phi = 0$ (1)

경계조건 :

(a) 물체 표면에 대해

$$-\nabla \phi \cdot \vec{e}_n = \vec{V}_E \cdot \vec{e}_n \quad (2)$$

(b) 유효 수면(z=0)에 대해

$$\begin{aligned} \vec{V}_s &= -(C_w - 1) \vec{V}_b \cdot \vec{k} \\ &= -\frac{\partial \phi}{\partial z}(x, y, 0) \cdot \vec{k} \end{aligned} \quad (3)$$

그리고 $\phi = 0$

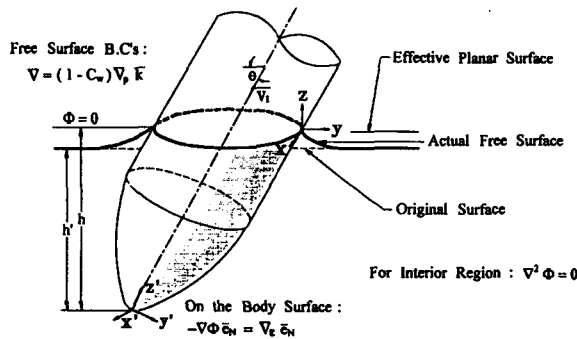


Fig. 1 Schematics of formulation

여기서 ϕ 는 속도 포텐셜을 나타내고, \vec{V}_E 는 물체의 입수속도, \vec{e}_n 은 물체 표면에 대한 단위 법선 벡터, \vec{V}_s 는 Waldraw[2]에 의해 소개된 유효 수면속도이며, \vec{V}_b 는 물체의 가장 깊은 곳의 속도를 의미한다. 이때 자유표면은 유효수면과 함께 표시되며, 그 위치는 h/h' 즉, wetting factor C_w 로 정의가 된다. Fig.1은 지배방정식과 경계조건, wetting factor 등을 나타내는 개략도이다.

3. 수치적 기법

3.1 소오스 패널 기법

소오스 패널 기법[1]은 물체 표면을 여러 개의 요소로 나누어 그 요소의 도심에 일정한 크기의 소오스 강도를 분포시켜 표현한다. 어떤 일정한 소오스 강도(σ_j)를 가지는 요소에 의해 유도된 속도 포텐셜은 해석적으로 다음과 같이 나타난다.

$$\phi_j(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi} \int_A \frac{\sigma_j dA}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}} \quad (4)$$

여기서 dA 는 요소의 표면적이고, (x_0, y_0, z_0) 는 요소의 도심의 좌표이며, (x, y, z) 는 구하고자

하는 Φ_j 의 위치를 나타내는 좌표이다.

위 식(4)를 식(1)에 대입해 보면 식(4)가 식(1)의 해가 됨을 알 수 있고, 이때 식(1)은 선형 편미분 방정식이므로 Φ_j 는 N개의 요소에 의해 유도되는 속도 포텐셜을 중첩하여 얻을 수 있게 된다. 각 요소의 소오스 강도로부터 유기된 속도는 물체 표면에서 경계조건(2)를 만족해야 하므로, N개의 요소에 식(4)를 적용하면 각각의 요소에 대해 1개의 방정식, 즉 N개의 연립방정식을 얻을 수 있고 이때의 미지수는 각 요소의 소오스의 강도, 즉 N개의 소오스 강도($\sigma_{j=1\sim N}$)가 되어 단일 해가 존재하게 된다. 이것을 행렬식 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$[A_{ij}]\{\sigma_j\} = [\vec{V}_E \cdot \vec{e}_{n_i}] \quad (5)$$

여기서 $\{\sigma_j\}$ 는 요소 j에서의 소오스 강도를 나타내고, \vec{e}_{n_i} 는 요소 i에서의 바깥쪽의 단위 법선 벡터를 의미한다. 또한 $[A_{ij}]$ 는 요소 j의 단위 소오스 강도에 의해 요소 i에 유도되는 법선 속도의 행렬을 의미한다. 식(5)을 풀어서 소오스 강도 $\{\sigma_j\}$ 가 얻어진 후에는, 각 도심에서의 속도 포텐셜을 다음과 같은 식으로부터 구할 수 있다.

$$\{\Phi\} = [B_{ij}]\{\sigma_j\} \quad (6)$$

여기서 $[B_{ij}]$ 는 요소 j의 단위 소오스 강도에 의해 요소 i에 유도되는 속도 포텐셜의 영향행렬 (Influence matrix)을 의미한다. 마지막으로 식(6)에서 계산된 속도 포텐셜을 이용하여 각 깊이에서의 표면압력계수를 다음과 같은 비정상상태 베르누이 방정식으로부터 계산할 수 있다.

$$C_p \equiv \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} = \frac{2}{V_\infty^2} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{2 \vec{V}_E \cdot \nabla \Phi}{V_\infty^2} - \left(\frac{\nabla \Phi}{V_\infty^2} \right)^2 \quad (7)$$

이 식에서 계산되어진 표면 압력계수값을 이용하여 항력계수, 수직 충격력, 충격 모멘트 등을 계산할 수 있게 된다.

3.2 요소의 제정의

물체가 요소의 집합으로 표시되기 때문에, 계산을 수행하기 전에 물체에 고정된 좌표계 (x', y', z')에 대해 요소를 생성하는 것이 필요하다. 물체 표면에 요소를 정의한 후에는 각 요소의 도심에 소오스를 위치시킨다. 계산은 물체가 물 속에 단위 시간 별로 입수되면서 진행되는 데 입수속도와 물체의 깊이는 매 단계마다 변하게 된다. 입수가 진행되는 동안 물체 표면의 요소는 다음과 같은 세 가지 유형으로 구분할 수 있는데 요소가 물 속에 완전히 잠긴 경우, 수면에 의해 교차된 경우, 수면 위에 위치한 경우가 그것이다. 현재의 소오스 패 널 기법의 경우, 충격 해석시 완전히 물에 잠긴 부분만을 고려하기 때문에 수면 위에 위치한 요소는 계산에서 제외되고 수면에 의해 교차된 요소는 계산을 위해 재정의할 필요가 있다. 수면에 의해 교차된 요소는 Fig.2에 나타나 있듯이, 하나의 절점이 물속에 잠겨 있는 경우와 두 개의 절점이 잠겨 있는 경우, 세 개의 절점이 잠겨 있는 경우로 나누어 생각해 볼 수 있다. 모든 경우에 대해 우선 수면과 교차하는 지점에 두 개의 새로운 절점을 생성시킨다. 두 개의 절점 중 수면 아래에 있는 절점의 좌표를

(x_1, y_1, z_1) 이라 하고 수면 위에 있는 절점의 좌표를 (x_2, y_2, z_2) 라고 하면, 수면 상에 새로 정의되는 절점의 좌표는 다음과 같은 식에 의해 결정이 된다.

$$\begin{aligned} x_{new} &= x_1 + \frac{x_2 - x_1}{z_1 - z_2} z_1 \\ y_{new} &= y_1 + \frac{y_2 - y_1}{z_1 - z_2} z_1 \\ z_{new} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

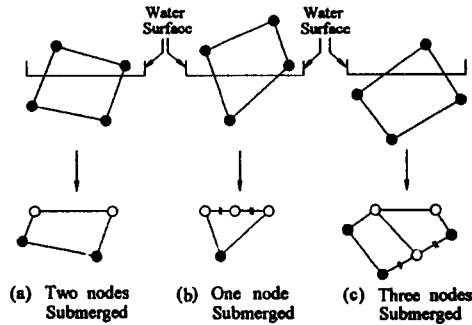


Fig. 2 Redefinition of element intersected by the free surface
(● : Original nodes, ○ : Redefined nodes)

계산에 사용되는 요소의 형태가 사각형이어야 하므로 재정의되는 요소도 사각형일 필요가 있다. Fig.2(a)와 같이 두 개의 절점이 물 속에 잠겨 있는 경우는 식(8)을 이용하여 수면상에 새로운 두 절점을 생성하게 되면 재정의되는 요소가 사각형이 되지만, Fig.2(b)와 같이 하나의 절점만이 물 속에 잠겨 있는 경우는 재정의된 요소의 형태가 삼각형이 되므로 사각요소를 생성하기 위해 새로운 절점이 하나 더 정의되어야 할 필요가 있다. 이 새로운 절점은 요소에서 수면을 따라 생성되는 선분을 이등분한 지점에 위치하게 된다. 또한 Fig.2(c)와 같이 세 개의 절점이 물속에 있는 경우는 오각형의 요소가 생성되므로, 수면과 마주보는 선분을 이등분한 지점에 또 하나의 절점을 위치시켜 오각형을 두 개의 사각형으로 나누어 두 개의 새로운 요소를 생성하게 된다.

3.3 가속도와 각가속도의 계산

식(7)을 이용하여 구한 수직충격력과 충격모멘트로부터 물체의 가속도 \vec{a} 및 각가속도 $\vec{\alpha}$ 를 다음의 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} + \vec{g} \quad (9)$$

$$\vec{\alpha} = \frac{\vec{M}}{I} \quad (10)$$

여기서 m 은 물체의 질량, I 는 물체의 관성모멘트, \vec{g} 는 중력 가속도를 나타낸다. 이와 같이

계산된 가속도와 각속도를 이용하여 다음 입수 단계에서의 속도 및 각속도를 다음 식을 이용하여 계산해 낼 수 있다.

$$\vec{\omega}^{n+1} = \vec{\omega}^n + \vec{a}\Delta t \quad (11)$$

$$\vec{V}_E^{n+1} = \vec{V}_E^n + \vec{a}\Delta t + \vec{r} \times \vec{\omega} \quad (12)$$

$$(x, y, z)^{n+1} = (x, y, z)^n + \vec{V}_E^{n+1} \cdot \Delta t \quad (13)$$

여기서 \vec{r} 는 무게중심으로부터 각 요소까지의 거리를 나타내는 벡터를 의미한다. 식(12)에서 계산된 \vec{V}_E^{n+1} 이 입수 다음 단계에서의 경계조건(2)에 사용되며 식(13)을 이용하여 입수체의 입수 다음 단계에서의 위치를 계산해 준다. 이때 식(13)을 통해 계산된 각 요소의 z 좌표들이 모두 수면인 $z=0$ 보다 크면 수면에서 바운딩되어 물체가 수면 밖으로 튕겨져 나가는 것이 된다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 프로그램을 검증하기 위하여 ogive형상이 수직 입수하는 경우에 대하여 충격량 해석을 수행하여 참고문헌[2]의 실험결과 및 다른 연구자의 결과와 비교해 보았다. 프로그램 검증을 수행한 후에 ogive형상이 작은 입수각도를 가지고 입수하는 경우에 입수각도와 질량의 변화에 따라 어떠한 입수 거동 변화가 있는가에 대해 조사해 보았다.

4.1 충격량 해석

Fig.3은 ogive 형상에 대한 치수와 표면에 생성된 요소를 나타낸 것이다.

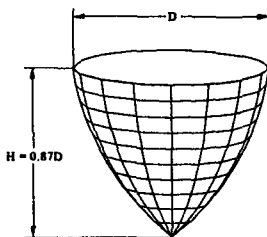


Fig. 3 Geometry of the ogive model (I)

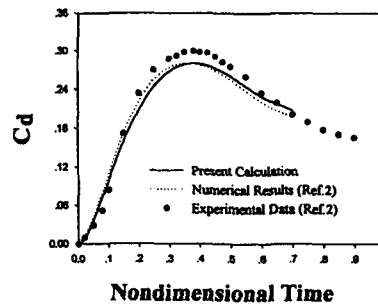


Fig. 4 Drag coefficient compared with experiment and other numerical data

입수조건으로 입수속도를 51.4 m/sec, 입수각도를 90°로 하여 계산을 수행해 본 결과, Fig.4에 나타낸 것처럼 참고문헌[2]의 실험결과 및 다른 계산 결과와 비교적 일치하는 경향을 나타내는 것을 관찰할 수 있었다.

4.2 입수 거동 해석

4.2.1 입수각도가 변하는 경우

Fig.5와 같은 ogive 형상의 물체에 대해 물체의 질량을 0.44 kg, 입수속도를 100 m/sec로 고정하고 물체의 입수각도를 10°, 20°, 30°로 변화시켜가면서 계산을 수행하여 보았다.

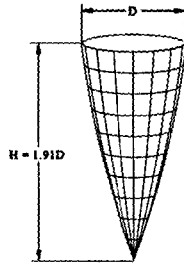
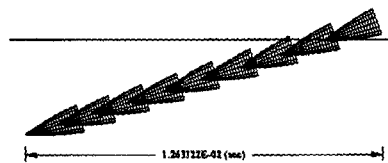


Fig. 5 Geometry of the ogive model (II)

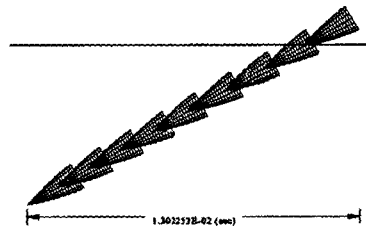
그 결과 입수각도가 10°인 경우는 Fig.6(a)에 나타나 있듯이 물체가 입수되지 못하고 수면위로 튕겨져 오르는 바운싱 현상이 발생하는 것을 관찰할 수 있었고, 입수각도가 20°와 30°인 경우는 Fig.6(b)와 Fig.6(c)에서 볼 수 있듯이 수면과 물체의 축선이 이루는 각도가 입수각도와 비교해 약간 변화되긴 했지만 완전히 입수가 진행되는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 입수초기에 발생하는 충격모멘트의 크기가 입수각도가 작을수록 더욱 크게 나타나기 때문에 발생하는 현상으로 생각할 수 있다.



(a) Entry angle 10°



(b) Entry angle 20°



(c) Entry angle 30°

Fig. 6 Water entry behavior and bouncing motion of the ogive

4.2.2 입수체의 질량이 변하는 경우

Fig.5에 나타낸 물체에 대해, 입수속도를 100 m/sec, 입수각도를 20°로 고정하고 물체의 질량을 0.03 kg, 0.44 kg, 6.66 kg으로 변화시켜 가며 계산을 수행해 보았다.

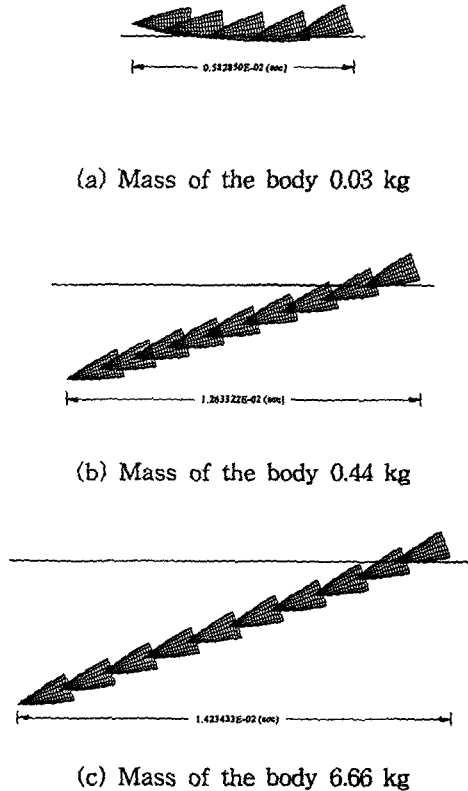


Fig. 7 Water entry behavior and bouncing motion of the ogive

그 결과, Fig.7(a)에서 볼 수 있듯이 물체의 질량이 0.03 kg으로 가장 작은 경우에는 입수가 진행되지 못하고 빠른 시간내에 바운싱되어 튀겨져 나가는 것을 볼 수 있었고, Fig.7(c)에서 볼 수 있듯이 물체의 질량이 6.66 kg으로 가장 큰 경우는 다른 경우와 비교해 볼 때 물체의 축선과 수면이 이루는 각도가 입수각도에 비해 거의 변화가 없이 입수가 진행되는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 물체의 질량과 관성모멘트가 서로 비례하는 까닭에 같은 크기의 충격모멘트에 대해 물체의 질량이 작은 경우는 상대적으로 큰 각가속도를 발생시키게되고 질량이 큰 경우에는 상대적으로 작은 각가속도를 발생시키기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

5. 결 론

고속으로 입수하는 물체의 입수 거동 변화를 계산할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 이때 입수 물체 주위의 유동은 비압축성 포텐셜 유동으로 가정하여 소오스 패널 기법을 적용하였다. 입수가 진행되는 동안에는 매 단계마다 요소를 재정의하여 소오스 패널 기법이 적용될 수 있게 하였고, 물체에 작용하는 충격력과 충격 모멘트를 이용하여 가속도 및 각가속도를 계산하여 물체의 입

수 거동 및 바운싱 현상을 해석할 수 있게 하였다. 본 연구에 사용된 프로그램의 검증을 위해 ogive 형상에 대해 충격량 해석을 수행해 본 결과 다른 연구자의 수치 해석 결과 및 실험 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었으며, 또한 ogive 형상이 작은 입수각도로 입수하는 경우에 대해 입수 거동 및 바운싱 현상을 해석해 본 결과 물리적으로 매우 타당한 결과를 얻을 수 있었다.

6. 참고 문헌

- [1] Hess, J. L. and Smith, A. M. O., "Calculation of Potential Flow About Arbitrary Bodies", *Progress in Aeronautical Sciences*, Vol.8, Pergamon Press, New York (1966), p.1-138.
- [2] Wardlaw, A. B. Jr., Morrison, A. M. and Baldwin, J. L., "Prediction of Impact Pressures, Forces, and Moments During Vertical and Oblique Water Entry", *Naval Surface Weapons Center Report, WOL/TR 77-16* (1977).
- [3] Von Kármán, T., "The Impact on Sea-Plane Floats During Landing", *NACA TM 321.*, (1929).
- [4] Wagner, H., "Über Stoss-und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten", *ZAMM* 12, 4 (1932).
- [5] Trilling, L., "The Impact of a Body on a Water Surface at an Arbitrary Angle", *Journal of Applied Physics*, Vol.21 (1950), p.161-170.
- [6] Waugh, J. G., "Water-Entry Pitch Modeling", *Journal of Hydronautics*, Vol.2, No.2 (1968), p.87-92.
- [7] Katz, J. and Plotkin, A., "Low-Speed Aerodynamics", McGraw-Hill, Inc. (1991).
- [8] May, A., "Vertical Entry of Missiles into Water", *Journal of Applied Physics*, Vol.23 (1952), p.1362-1372.
- [9] Toyama, Y., "Two-Dimensional Water Impact of Unsymmetrical Bodies", *일본조선학회 논문집*, 제173호, p.285-291.
- [10] Moran, J. P., "The Vertical Water-Exit and -Entry of Slender Symmetric Bodies", *Journal of the Aerospace Sciences*, p.1481-1482.