

고속으로 입수하는 물체에 대한 충격량 및 입수 거동 해석

김영우^{*1}, 박원규^{*2}, 김찬수^{*3}

Numerical Analysis of Impact Forces and Entry Behaviors of the High Speed Water Entry Bodies

Y. W. Kim, W. G. Park and C. S. Kim

The numerical methodology for computing the impact forces and water entry behaviors of high speed water entry bodies was 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 was applied to disk, cone and ogive model and compared with experimental data. Good agreement was obtained. The water entry behavior such as the bouncing phenomena from the free surface was also simulated using the impact forces and two degree of freedom dynamic equation. Physically acceptable results were obtained.

Key Words : 입수문제(Water-Entry Problem), 소오스 패널 기법(Source Panel Method), 충격량(Impact Force) 계산, 입수 거동 현상(Water Entry Behavior), 바운싱 현상(Bouncing Phenomena), 2 자유도 동역학(2 Degree of Freedom Dynamic Equation)

1. 서 론

입수하는 물체의 충격량 해석문제는 여러 공학 분야에서 관심을 끌고 있는 문제인데, 특히 어뢰나 폭뢰와 같이 빠른 속도로 입수하는 물체를 설계하기 위해서는 입수시 충격력이나 충격 모멘트 등이 정확하게 계산되어야 할 필요가 있다. 만약 빠른 속도로 입수하는 물체들이 이러한

충격량에 대한 고려없이 설계된다면, 입수시 발생하는 강한 충격력으로 인해 입수되는 과정에서 물체가 파괴되거나 입수물체에 장착되어 있는 정교한 전자회로가 파손되는 현상 등의 문제점을 초래할 수 있기 때문이다.

입수 충격량 해석에 관한 연구는 1930년대 von Karman[1]에 의해 Added mass 개념과 선형화된 자유 표면 경계 조건을 사용하여 처음으로 시도되었는데, 이 방법은 단순한 형상의 수직 입수문제에 국한되어 있었다. 그 이후에 Chu와 Falconer[2]가 비선형 자유표면 효과를 고려하였으며 Vander Vorst와 Rogers[3]는 Marker-and-Cell (MAC)방법을 이용한 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 풀어서 원추 형상

*1 학생회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

*2 정회원, 부산대학교 기계기술연구소(기계공학부)

*3 국방 과학 연구소 (진해)

이 수직으로 입수할 때의 상세한 점성효과를 해석하였다. 그러나 이 방법은 물체의 무게 효과를 고려하지 않았고, 해가 물체 근처에서 잘 일치하는 반면에 계산시간이 너무 많이 소요되는 한계점을 지니고 있었다.

한편 충격량 해석과는 별도로 임의의 형상 주위의 3차원 비압축성 포텐셜 유동장을 해석하기 위해 Hess와 Smith[4]는 소오스 패널 기법(Source Panel Method)을 소개하였는데, 이 방법은 현재까지 항공·조선·기계 분야 등에서 널리 적용되고 있다.

본 연구에서는 충격이라는 것이 매우 짧은 시간 내에 발생하는 물리적 현상이므로 점성에 의한 효과가 충격량에 큰 영향을 끼칠 만한 충분한 시간적 여유가 없다고 가정하여 물체에 입수하는 물체 주위의 유동을 비점성 포텐셜 유동으로 가정하고 이를 해석하기 위해 소오스 패널 기법을 사용하였다. 입수 충격 물체 주위의 유동을 이와 같이 포텐셜 유동으로 가정한 것은 물체가 정지상태에서 갑자기 움직이는 경우, 물체 주위의 유동은 처음 매우 짧은 시간동안 비점성 포텐셜 유동의 거동을 한다는 사실에 근거하여 설득력을 지닐 수 있으리라 본다. 그리고 무게중심에 대한 충격력과 충격모멘트를 이용한 2자유도 동역학 문제를 해석함으로써 입수거동 및 작은 입수각도에서 물체가 수면 밖으로 튕겨져 나가는 바운싱(bouncing) 현상에 대해 연구하였다. 본 저자들이 아는 바로는 비록 입수 충격량 계산은 국내에서도 수행된 적이 있으나 입수거동 및 수면 바운싱 현상의 해석은 국내외적으로 처음있는 시도로 여겨진다.

2. 지배방정식 및 경계조건

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

$$\text{지배방정식: } \nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

경계조건 :

$$\text{(a) 물체 표면에 대해} \\ -\nabla \phi \cdot \vec{e}_n = \vec{V}_E \cdot \vec{e}_n \tag{2}$$

$$\text{(b) 유효 수면}(z=0)\text{에 대해} \\ \vec{V}_s = -(C_w - 1)\vec{V}_b \cdot \vec{k} \\ = -\frac{\partial \phi}{\partial z}(x, y, 0) \cdot \vec{k} \tag{3}$$

그리고 $\phi = 0$

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[5]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.

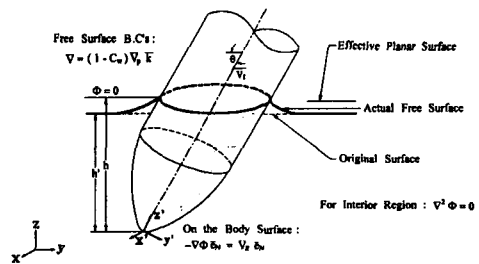


Fig. 1 Schematics of formulation

3. 수치적 방법

3.1 소오스 패널 기법

소오스 패널 기법[4]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.

$$\phi_j(x, y, z) \tag{4}$$

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

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 N개의 요소에 의해 유도되는 ϕ_j 는 각 요소에 의해 생기는 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 모두 N개의 연립방정식을 얻을 수 있

고 이때의 미지수는 각 요소의 소오스의 강도, 즉 N개의 미지의 소오스 강도($\sigma_{j=1-N}$)가 되어 단일해가 존재하게 된다. 이것을 행렬식 형태로 나타내면 다음과 같다.

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

여기서 $\{\sigma_j\}$ 는 요소 j에서의 소오스 강도를 나타내고, \vec{e}_n 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 영향 행렬(Influence matrix)을 의미한다. 마지막으로 식(6)에서 계산된 속도포텐셜을 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 항력 계수, 수직 충격력, 충격 모멘트 등을 계산할 수 있게 된다.

3.2 요소의 재정의

물체가 요소의 집합으로 표시되기 때문에, 계산을 수행하기 전에 물체에 고정된 좌표계 (x', y', z')에 대해 요소를 생성하는 것이 필요하다(Fig.1 참조). 물체 표면에 요소를 정의한 후에는 각 요소의 도심에 소오스를 위치시킨다. 계산은 물체가 물 속에 단위 시간 별로 입수되면서 진행되는데 입수속도와 물체의 깊이는 매 단계마다 변화하게 된다. 입수가 진행되는 동안 물체 표면의 요소는 세 가지 유형으로 구분할 수 있는데 요소가 물 속에 완전히 잠긴 경우, 수면에 의해 교차된 경우, 수면 위에 위치한 경우가 그것이다. 현재의 소오스 패널 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 절점

이 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)이라고 하면, 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.

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

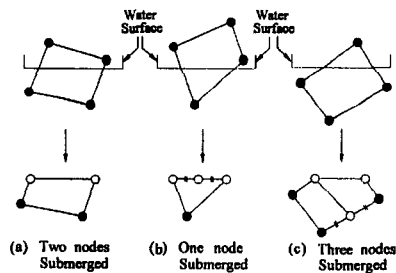


Fig. 2 Redefinition of element intersected by the free surface

(● : 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 충격력(\vec{F})과 충격모멘트(\vec{M})로부터 물체의 가속도(\vec{a}) 및 각가속도($\vec{\alpha}$)를 다음과 같은 식으로 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 관성모멘트를 나타낸다. 이와 같이 계산된 가속도와 각가속도를 이용하여 다음 단계에서의 속도 및 각속도($\vec{\omega}$)를 다음 식을 이용하여 계산해 낼 수 있다.

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

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

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

여기서 \vec{r} 은 무게중심으로부터 각 요소의 도심까지의 거리를 나타내는 벡터를 의미한다. 식(12)에서 계산된 \vec{V}_E^{n+1} 이 다음 입수 단계에서의 경계조건(2)에 사용된다. 식(13)을 통해 계산된 각 요소의 z 좌표들이 모두 수면인 $z=0$ 보다 크면 수면에서 바운싱되어 물체가 수면 밖으로 튕겨져 나가는 것이 된다.

4. 결과 및 고찰

본 연구의 결과를 검증하기 위하여 disk 형상이 여러 가지 입수각도를 가지고 입수하는 경우에 대하여 계산한 결과를 참고문헌[5]에 나와 있는 실험 결과와 비교해 보았다. 또한 cone형상과 ogive형상이 수직으로 입수하는 경우에 대해서도 참고문헌[2]의 실험 결과 및 계산 결과와 비교해 보았다. 그리고, 입수각도를 작게 한 경우 ogive형상의 물체가 입수각도와 질량의 변화에 따라 어떠한 입수 거동을 하는가에 대해 조사해 보았다.

4.1 입수 충격량 해석

4.1.1 Disk의 경우

Fig.3은 계산에 사용된 disk의 표면에 생성된 요소를 나타낸 것이다. 입수조건으로 입수속도(V_E)와 wetting factor(C_w)를 각각 30.48 m/sec와 1.45로 고정하고 입수각도를 75°, 60°, 45°, 30°로 바꿔가면서 계산을 수행해 본 결과, Fig.4에 나타낸 것처럼 참고문헌[5]의 실험결과와 유

사한 경향을 보이는 것을 관찰할 수 있었다. 이때, C_z 은 z' 축에 평행한 충격력에 대한 무차원 계수로써 다음으로 정의된다.

$$C_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho V_E^2 A} \quad (14)$$

그리고 무차원 시간 t^* 는 다음과 같이 정의된다.

$$t^* = \frac{V_E \times t}{D} \quad (15)$$

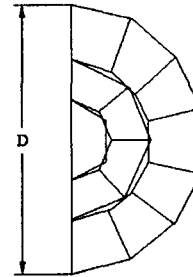


Fig. 3 Geometry of the disk model

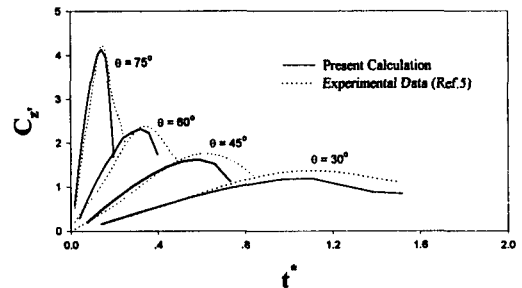


Fig. 4 Impact drag coefficient of the disk

4.1.2 Cone의 경우

Fig.5는 계산에 사용된 cone형상에 대한 치수와 표면에 생성된 요소를 나타낸 것이다.

이때 β 는 cone의 반각을 의미하는 것으로, β 값이 45° 및 22.5°인 cone형상에 대해 항력계수값을 조사해 보았다. 입수조건으로 입수속도를 9.76 m/sec, 입수각도를 90°로 고정하고 wetting factor는 β 가 45°인 경우 1.24, β 가 22.5°인 경우 1.14를 사용하여 계산을 수행해 본 결과, Fig.6에 나타나 있는 것처럼 최대항력계수가 발생하기 전까지 참고문헌[5]의 실험결과와 본 연구의 결과가 거의 일치하고 있음을 관찰할 수 있었다.

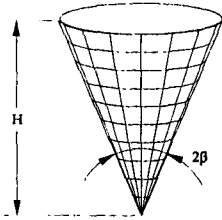


Fig. 5 Geometry of the cone model

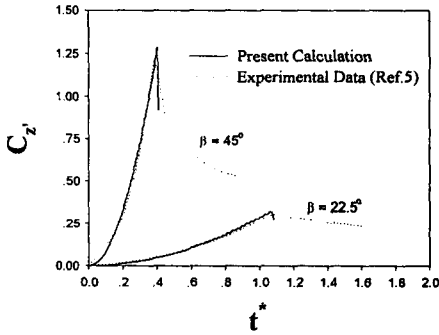


Fig. 6 Impact drag coefficient of the cone

4.1.3 Ogive의 경우

Fig.7은 ogive 형상에 대한 치수와 표면에 생성된 요소를 나타낸 것이다.

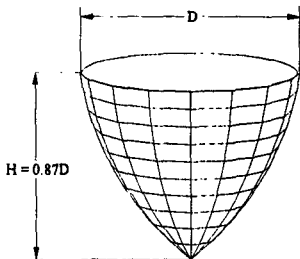


Fig. 7 Geometry of the ogive model

입수조건으로 입수속도를 51.4 m/sec, 입수각도를 90° 로 고정하여 계산을 수행해 본 결과, Fig.8에 나타낸 것처럼 참고문헌[2]의 실험결과 및 다른 계산 결과와 유사한 경향을 나타내는 것을 관찰할 수 있었다.

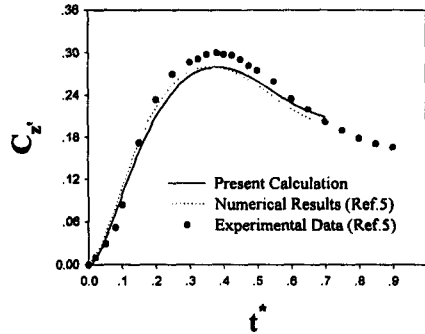


Fig. 8 Impact drag coefficient of the ogive

4.2 입수 거동 및 바운싱 해석

4.2.1 입수각도가 변하는 경우

Fig.9와 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.

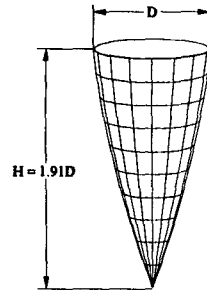
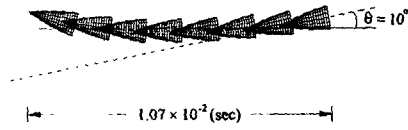


Fig. 9 Geometry of the ogive model

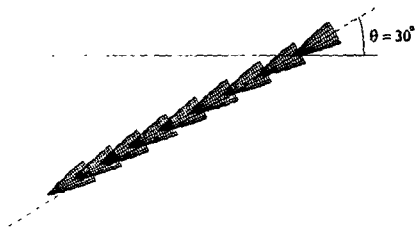
그 결과 입수각도가 10° 인 경우는 Fig.10(a)에 나타나 있듯이 물체가 입수되지 못하고 수면위로 튕겨져 오르는 바운싱 현상이 발생하는 것을 관찰할 수 있었으며 수면과 접촉하는 시간은 약 $\Delta t \cong 1.07 \times 10^{-2}$ sec 정도였다. 그러나, 입수각도가 20° 와 30° 인 경우는 Fig.10(b)와 Fig.10(c)에서 볼 수 있듯이 수면과 물체의 축선이 이루는 각도가 입수각도와 비교해 약간 변화되긴 했지만 완전히 입수가 진행되는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 입수초기에 발생하는 충격모멘트의 크기가 입수각도가 작을수록 더욱 크게 나타나기 때문에 발생하는 현상으로 생각할 수 있다.



(a) Entry angle 10°



(b) Entry angle 20°



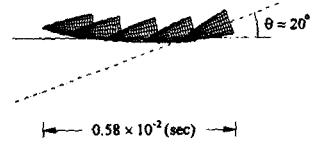
(c) Entry angle 30°

Fig. 10 Water entry behavior and bouncing motion of the ogive

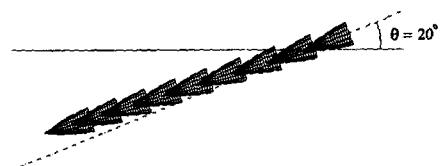
4.2.2 물체의 질량이 변하는 경우

그림 9의 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.

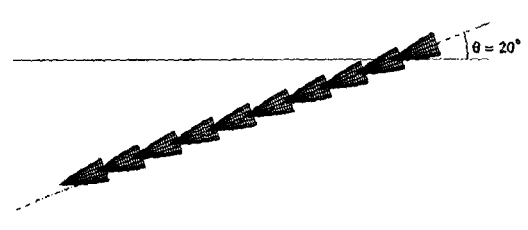
그 결과, Fig.11(a)에서 볼 수 있듯이 물체의 질량이 0.03 kg으로 가장 작은 경우에는 입수가 진행되지 못하고 빠른 시간내($\Delta t \cong 0.58 \times 10^{-2}$ sec)에 바운싱되어 튀겨져 나가는 것을 볼 수 있었고, Fig.11(c)에서 볼 수 있듯이 물체의 질량이 6.66 kg으로 가장 큰 경우는 다른 경우와 비교해 볼 때 물체의 축선과 수면이 이루는 각도가 입수각도에 비해 거의 변화가 없이 입수가 진행되는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 물체의 질량과 관성모멘트가 서로 비례하는 까닭에 같은 크기의 충격모멘트에 대해 물체의 질량이 작은



(a) Mass of the body 0.03 kg



(b) Mass of the body 0.44 kg



(c) Mass of the body 6.66 kg

Fig. 11 Water entry behavior and bouncing motion of the ogive at $\theta = 20^\circ$

경우는 상대적으로 큰 각가속도를 발생시키게 되고 질량이 큰 경우에는 상대적으로 작은 각가속도를 발생시키기 때문에 나타나는 현상이다.

5. 결 론

입수하는 물체에 발생하는 충격력과 충격 모멘트 및 물체의 입수 거동 변화를 계산하기 위해 입수 물체 주위의 유동을 비압축성 포텐셜 유동으로 가정하여 소오스 패널 기법을 적용하였다. 그리고 물체에 작용하는 충격력과 충격 모멘트를 이용하여 가속도 및 각가속도를 계산하여 물체의 입수 거동 및 바운싱 현상을 해석하였다. 본 연구에 사용된 프로그램의 검증을 위해 disk, cone, ogive 형상에 대해 충격량 해석을 수행해 본 결과, 다른 연구자의 수치 해석

결과 및 실험 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. Ogive 형상에 대해 입수각도를 10° , 20° , 30° 로 변화시켜 계산한 결과 입수각도가 10° 인 경우에 바운싱 현상이 발생함을 알 수 있었으며, 입사각도가 20° 인 경우에 입수체 질량을 0.03kg, 0.44kg, 6.66kg으로 변화시켜 계산한 결과 0.03kg의 경우에 바운싱 현상이 발생됨을 알 수 있었다. 본 연구를 통해, 바운싱현상은 입수각도와 입수체 질량의 함수임을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- Aerodynamics", *McGraw-Hill, Inc.* (1991).
- [10] Toyama, Y., "Two-Dimensional Water Impact of Unsymmetrical Bodies", *일본조선학회 논문집*, 제173호, p.285-291.
- [1] Von Kármán, T., "The Impact on Sea-Plane Floats During Landing", *NACA TM 321*. (1929).
- [2] Chu, W. H. and Falconer, D. R., "Further Development of a More Accurate Method for Calculating Body-Water Impact Pressures", *Southwest Res. Inst. Tech. Rept.*, No. 5. (1963).
- [3] Vander Vorst, M. J., and Rogers, J. C. W., "Calculation of Vertical Water Entry by the Partial Cell Marker and Cell Method," *Proceedings of the 1976 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute* (1976).
- [4] 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.
- [5] 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).
- [6] 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.
- [7] May, A., "Vertical Entry of Missiles into Water", *Journal of Applied Physics*, Vol.23 (1952), p.1362-1372.
- [8] Waugh, J. G., "Water-Entry Pitch Modeling", *Journal of Hydronautics*, Vol.2, No.2 (1968), p.87-92.
- [9] Katz, J. and Plotkin, A., "Low-Speed