
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 31 卷 第 2 號 1994年 5月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 31, No. 2, May 1994

평면 두부형상을 갖는 물체의 입수시 충격력 해석
 강 창 구*

Analysis of Impact Forces Acting on a Flat Faced Body
 Entering Water

by

Chang - Gu Kang*

요 약

물체가 입수시 두부에 큰 충격을 받게 되며 이 충격량은 진입하는 물체의 두부형상이나 입사각에 따라서 많은 차이를 보인다.

본 논문에서는 선수부가 평면 부분을 포함하는 형상을 갖는 물체가 임의 각도 입수시의 충격량을 계산하였다. 선수부가 납작한 부분을 포함하면 임의 각도 입수시 물체의 접수부분이 기하학적으로 복잡해진다. 3차원 물체를 여러 영역으로 분할하여 각 부분을 곁3차 B-spline으로 표시하여 곡면을 정확히 나타낼 수 있도록 하였다. 자유표면 조건은 $\phi=0$ 을 적용하였으며, 경계치 문제는 Green함수를 이용하여 해석하였다.

Abstract

Impact forces are acting on the fore part of a body entering water and those are function of the shape of the fore part and entrance angle.

In this paper, impact forces are computed for the flat faced body with arbitrary entrance angle. The geometric characteristics of the wetted surface of the body are complicated. The surface is divided into several smooth parts and each of them is represented by a bi-cubic B-spline. The free surface condition, $\phi=0$, is applied at the undisturbed free surface and the boundary value problem is analyzed by using Green's function.

발표일자 : 1993년도 대한조선학회 추계연구발표회('94.11.12)

접수일자 : 1994년 1월 27일

* 정회원, 선박해양공학연구센터

1. 서 언

물체가 입수시(water entry) 두부에 충격을 받게 된다. 이러한 현상은 파도에 의한 슬래밍(slamming)과 유사한 것으로서 물체가 물에 진입할 때 물을 갑자기 가속시킴으로써 진입하는 물체에 충격을 주게 된다. 이 충격량은 진입하는 물체의 두부형상이나 입사각에 따라서 많은 차이를 보이고 있다.

입수 충격문제에 대해서 지난 수십년동안 여러가지 방법으로 연구되어 왔지만 대부분의 이론은 2차원 연직면에서의 입수 충격문제를 다루고 있다. 고전적인 충격문제는 von Karman [19]에 의해서 정식화되었으며 Wagner [20]에 의해서 수정되었다. 그 후의 연구들은 주로 이 두 논문을 참고하고 있다. Payne [14]은 von Karman의 결과에 대한 수정이 결코 충격력추정의 개선을 가져오지 않는다고 한바 있으며, Sarpkaya & Isaacson [15]은 von Karman 형태의 충격력 해를 해양공학에 적용하는 문헌에 대한 조사를 수행했다. 이것은 주로 원형 추상체에 대한 파도의 충격력을 고려할 때 중요하다.

최근에 중력영향을 포함하는 2차원 비선형 자유 표면문제를 수치적으로 풀고 있다. Yim [22], Gallagher & McGregor [5], Greenhow [7] 등이 여러가지 수치방법을 사용하여 스프레이 제트(spray jet)를 포함한 2차원 쐐기(wedge)의 충격문제를 해결하려고 시도하였으나 완전한 해석 결과를 보여주지 못하였다. 그러나, 최근에 Zhao & Faltinsen [23]이 2차원 물체의 입수시 제트 부분을 따로 처리함으로써 비선형 자유표면 조건을 만족하는 수치해석법을 제시하였다.

그동안 3차원 충격력 문제를 엄밀하게 풀려고 시도하는 경우는 상대적으로 적었다. 3차원 해석은 Shiffman & Spencer [16], Chuang [2], Miloh [9], Troesch & Kang [17, 18] 등에 의해서 수행되었다. Shiffman & Spencer [16]와 Chuang [2]은 원뿔(cone)에 작용하는 압력분포 및 슬래밍 힘에 대한 연구를 수행했으며 Miloh [9]는 해석적인 방법으로 이중구형체(double spherical bowl)에 대한 부가질량계수를 구하고, 이 계수로 부터 구(球)에 대한 충격력을 계산하였다. 이때 자유표면조건은 $\phi = 0$ 를 사용하였다.

충격력을 계산하기 위해서는 3차원 경계치문제를 풀어야 하지만 2차원 스트립이론(strip theory)으로 문제를 단순화하여 해석한 예가 많다. 예를 들어 Ochi & Motter [11, 12], Yamamoto, et al. [21], Belik, et al. [1] Oliver [13] 등이 스트립이론을 사용하였

다. 이 이론은 배와 같이 길이가 충분히 길고 단면적의 변화가 심하지 않아서 선체를 길이 방향으로 나누어 각각에 대한 문제를 풀고 이 결과를 더함으로써 충격력을 얻는 것이다. 이러한 방법은 수중 운동체와 같이 선수부형상이 구(球)에 가까우며 연직에 가까운 각도로 입수할 때에는 적합하지 않는 것으로 평가되고 있다(Troesch & Kang [18]). 실제로 참고문헌 [17]에서 구(球)에 대한 충격력을 3차원이론과 스트립이론으로 계산한 결과를 실험결과와 비교하고 있으며, 스트립 이론에 의한 계산결과는 실험치와 상당한 차이를 보이고 있다.

본 논문에서는 선수부가 납작한 부분(flat part)을 포함하는 기하학적인 형상을 갖는 3차원 수중운동체가 임의 각도입수시의 충격력을 계산하였다. 선수부가 납작한 부분을 포함하면 임의 각도 입수시 물체의 접수부분이 기하학적으로 복잡해지기 때문에 보통 물체 형상과 입수각에 따라 2~3개의 부분으로 분할하여 각 부분을 겹3차(bi-cubic) B-spline으로 표시하여 곡면을 정확히 나타낼 수 있도록 하였다. 경계치 문제는 Green함수를 이용하여 해석하였다. 경계치 문제의 해석결과로부터 두부형상에 대한 수직입수시 물체에 작용하는 충격력을 계산하였다. 이 방법에 의해서 계산된 결과들은 수중운동체의 선수형상 설계의 기초자료로 활용되고, 진입후 수중에서의 운동예측을 위하여 초기상태 변수들을 결정하기 위한 자료로 활용될 수 있다.

2. 문제의 정식화

입수시 물체가 유체를 밀어낼 때 유체를 가속시키기 때문에 충격력의 대부분은 물의 관성효과로부터 기인한다고 볼 수 있다. 완전한 강체가 자유표면을 통과하는 이상유체를 생각하자. 점성, 표면장력, 공기포획(air entrapment), 공기나 물의 압축성, 탄성효과 등은 무시된다. 따라서 유체는 비점성, 비압축성, 비회전성이라고 가정한다. 유체영역 R은 물체 표면 S_b , 자유표면 S_f , 무한원방의 표면 S_∞ 로 둘러싸여있다(Fig. 1). 전체적으로 모든 표면을 합쳐서 S라고 표시한다.

자유표면은 다음과 같이 정의된다.

$$z = \zeta(x, y, t) \tag{1}$$

이때 좌표계는 xy면이 정수면에 놓이는 우수좌표계이며 z 좌표는 상방향인 양이다. Newman [10]은 운동학적(kinematic)경계조건과 동력학적(dynamic)경계 조건을 고려한 자유표면조건을 유도하였다.

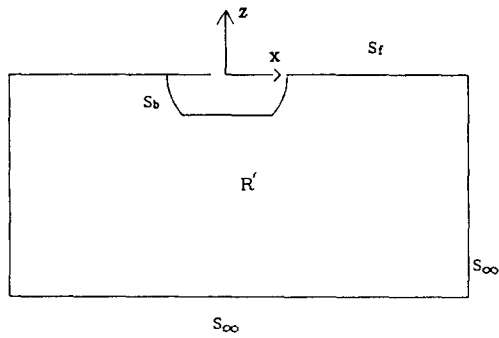


Fig. 1 Coordinate system

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} + 2 \nabla \phi \cdot \nabla \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla (\nabla \phi \cdot \nabla \phi) = 0 \quad (2)$$

윗 식에서 ϕ 는 속도 포텐셜이고 식(2)는 식(1)에 의해서 주어진 표면에서 만족되어야 한다. 속도 포텐셜과 Green 함수에 대한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi(\underline{x}) &= 0 \\ \nabla^2 G(\underline{x}, \underline{y}) &= -\delta(\underline{x} - \underline{y}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, \underline{x} 는 관측점까지의 위치벡터이고, \underline{y} 는 소오스점까지의 위치벡터이다. 그리고 $\delta(\underline{x} - \underline{y})$ 는 Dirac delta 함수이다. 유체영역 R' 에 대해서 Green 2종 identity를 적용하면 포텐셜은 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha(\underline{x}, t) \phi(\underline{x}, t) = \iint_{S_b + S_r + S_\infty} \left[\frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial}{\partial n} \right] G ds \quad (4)$$

여기서, α 는 solid angle이다. 이 충격문제에서는 식(2)의 자유표면조건중에서 시간변화율이 다른 항에 비해서 훨씬 크기 때문에 자유표면조건이 다음과 같이 단순화될 수 있다.

$$\phi = 0 \quad \text{on} \quad z = 0 \quad (5)$$

따라서 이에 적합한 Green 함수는 다음과 같다.

$$G(\underline{x}, \underline{y}) = \frac{1}{|\underline{x} - \underline{y}|} - \frac{1}{|\underline{x} - \underline{y}'|} \quad (6)$$

여기서, \underline{y}' 은 $z=0$ 에 관한 \underline{y} 의 경상(image)이다. $G(\underline{x}, \underline{y})$ 와 $\phi(\underline{x})$ 가 모두 $S_r(z=0)$ 에서 0이고, 둘다 물체로부터 멀리 떨어질 때 충분히 빨리 0이 되기 때문

에 식(4)의 S_r 와 S_∞ 상의 적분은 기여하는 바가 없다. 또한, 물체경계 조건은 그 순간에 물체표면상에서 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \underline{V} \cdot \underline{n} \quad (7)$$

여기서, \underline{V} 는 물체의 속도를 나타낸다.

3. 수치 계산 방법

적분방정식을 수치적으로 풀기 위하여 물체 표면을 작은 요소로 분할한다. 이 작은 요소들은 겹3차(bi-cubic) B-spline 알고리즘(Barsky & Greenberg [24], Barsky[25])에 의해서 표시된다. 작은 표면 요소 ΔS_{ij} 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{ij}(u, v) &= \sum_{s=-2}^1 \sum_{t=-2}^1 b_s(u) V_{1+s, j+t}^x b_t(v) \\ y_{ij}(u, v) &= \sum_{s=-2}^1 \sum_{t=-2}^1 b_s(u) V_{1+s, j+t}^y b_t(v) \\ z_{ij}(u, v) &= \sum_{s=-2}^1 \sum_{t=-2}^1 b_s(u) V_{1+s, j+t}^z b_t(v) \end{aligned} \quad (8)$$

for $0 \leq u \leq 1$ and $0 \leq v \leq 1$

이것은 곡면요소를 표시한다. 또, ϕ 와 $\frac{\partial \phi}{\partial n}$ 이 곡면 요소내에서 점선형적(bilinear)으로 변한다고 가정한다. 즉,

$$\begin{aligned} \phi &= a_0 + a_1 u + a_2 v + a_3 uv \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} &= b_0 + b_1 u + b_2 v + b_3 uv \end{aligned} \quad (9)$$

for $0 \leq u \leq 1$ and $0 \leq v \leq 1$

관측점(field point)이 요소의 꼭지점이 아닐 때에는 각 곡면 요소에 대한 면적분은 2점 Gauss 구적분법(Ferziger [3])을 이용하여 계산된다. 식(4)에서 $\partial G / \partial n$ 은 특이성을 갖고 있지 않지만, G 는 변환된 $u-v$ 영역내에서 $(\frac{1}{R})$ 형태의 특이부분과 수치적분을 수행하는 비특이부분으로 나누어진다.

3.1 $(\frac{1}{R})$ 형태의 특이 적분

식(4)에서 관측점이 특이점에 접근함에 따라 G 는

($\frac{1}{R}$) 형태의 특이점을 갖는다. 이런 형태의 특이성은 면적분에서 적분가능하다.

$$I = \iint_{\Delta S_{ij}} \phi_n \frac{1}{R} ds \quad (10)$$

먼저, 특이점 면요소 ΔS_{ij} 에 의해서 면요소의 꼭지점중의 하나인 점 (f_{10}, g_{00}, h_{00}) 에 유기 포텐셜을 고려하자. 식(8)은 다음과 같은 형태로 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} x' &= \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 f_{ij} u^i v^j \\ y' &= \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 g_{ij} u^i v^j \\ z' &= \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 h_{ij} u^i v^j \end{aligned} \quad (11)$$

참고문헌 [8]에서와 같이 식(10)을 이용하여 dS 와 R 은 $u-v$ 평면으로 변환되고, $u=0$ 와 $v=0$ 에 관한 Taylor급수로 전개될 수 있다.

$$\begin{aligned} dS &= |J| dudv \\ &= \sqrt{EG - F^2} dudv \\ &= \left\{ \left[\left(\frac{\partial x'}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial y'}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial z'}{\partial u} \right)^2 \right] \right. \\ &\quad \left. \left[\left(\frac{\partial x'}{\partial v} \right)^2 + \left(\frac{\partial y'}{\partial v} \right)^2 + \left(\frac{\partial z'}{\partial v} \right)^2 \right] \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{\partial x'}{\partial u} \frac{\partial x'}{\partial v} + \frac{\partial y'}{\partial u} \frac{\partial y'}{\partial v} + \frac{\partial z'}{\partial u} \frac{\partial z'}{\partial v} \right) \right\}^{1/2} dudv \end{aligned} \quad (12)$$

$$= [J_0 + H.O.T] dudv$$

여기서, J_0 은 다음과 같다.

$$J_0 = \left\{ (f_{10}g_{01} - f_{01}g_{10})^2 + (g_{10}h_{01} - g_{01}h_{10})^2 + (h_{10}f_{01} - h_{01}f_{10})^2 \right\}^{1/2} \quad (13)$$

그리고, R 은 다음과 같이 전개될 수 있다.

$$\begin{aligned} R &= \left\{ (x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2 \right\}^{1/2} \\ &= \left\{ (-f_{10}u - f_{01}v \dots)^2 + (-g_{10}u - g_{01}v \dots)^2 \right. \\ &\quad \left. + (-h_{10}u - h_{01}v \dots)^2 \right\}^{1/2} \\ &= \sqrt{Au^2 + Buv + Cv^2} + H.O.T. \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, A, B, C 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A &= f_{10}^2 + g_{10}^2 + h_{10}^2 \\ B &= 2(f_{10}f_{01} + g_{10}g_{01} + h_{10}h_{01}) \\ C &= f_{01}^2 + g_{01}^2 + h_{01}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

적분 I 를 2부분으로 나눌 수 있다. 그 중 하나는 피적분함수에 특이부분이 포함된 것이고 나머지 하나는 특이부분을 포함하지 않는 것이다. 식(11)~(15)를 이용하여 식(9)를 정리하면 첫번째 적분 I_1 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_1 = b_0 J_0 \int_0^1 \int_0^1 \frac{dudv}{(Au^2 + Buv + Cv^2)^{1/2}} \quad (16)$$

적분 I_1 은 다음과 같이 해석적인 표현을 갖고 있다 (Gradsteyn & Ryzhik [6], Forbes [4]).

$$\begin{aligned} I_1 &= b_0 J_0 \left[\frac{1}{\sqrt{A}} \ln(2A + B + 2\sqrt{A(A+B+C)}) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\sqrt{A}} \ln(B + 2\sqrt{AC}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{C}} \ln(2C + B + 2\sqrt{C(A+B+C)}) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\sqrt{C}} \ln(B + 2\sqrt{AC}) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

두번째 적분은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} I_2 &= \int_0^1 \int_0^1 \left[\frac{(b_0 + b_1u + b_2v + b_3uv)J}{R} \right. \\ &\quad \left. - \frac{b_0 J_0}{\sqrt{Au^2 + Buv + Cv^2}} \right] dudv \end{aligned} \quad (18)$$

적분 I_2 는 $u=0, v=0$ 근처에서 ($\frac{1}{R}$) 형태의 특이성을 갖고 있지 않다. 따라서 I_2 는 2점 Gauss 구적분법을 이용하여도 정확하게 계산될 수 있다. 이와 비슷하게 적분(10)은 나머지 꼭지점($u=0, v=1$), ($u=1, v=0$), ($u=1, v=1$)에서도 같은 방법으로 구할 수 있다.

4. 수치 계산

물체운동이 주어지면, 물체에 작용하는 압력 p , 모멘트는 Runge-Kutta와 같은 복잡한 수치적 방법을 사

용하지 않아도 계산될 수 있다. 더우기 물체운동이 병진운동만을 갖고 있을 경우 Troesch & Kang [17]에서 언급한 바와 같이 식(4)보다 훨씬 간단한 법선 다이폴 방법이 사용될 수도 있다. 그러나 물체운동이 미리 알려져 있지 않고 회전운동을 포함할 경우 상대적으로 복잡한 수치적분 방법이 요구된다.

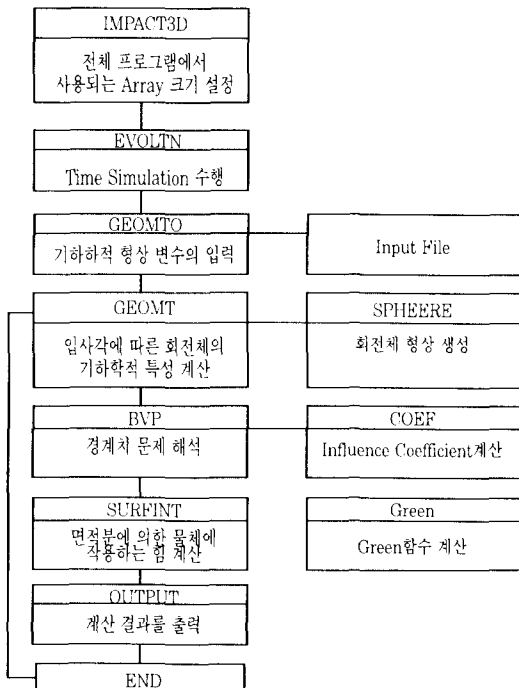
물체에 작용하는 압력을 계산하는 식은 Bernoulli 방정식으로 부터 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{p}{\rho} = \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi - gz$$

$$= -\frac{d\phi}{dt} + \mathbf{V} \cdot \nabla \phi - \nabla \phi \cdot \nabla \phi - gz.$$
(19)

여기서, $\frac{d}{dt}$ 는 비관성물체 고정좌표계에서의 시간변화율을 나타낸다.

본 논문에서는 충격력을 구하기 위하여 식(19) 중 에서 첫번째항에 대한 계산만을 수행하였다. Troesch & Kang [17]에서 보는 바와 같이 두번째와 세번째항은 서로 상쇄되고 마지막 항은 부력항을 나타내기 때문에 첫번째 항만을 충격력으로 고려하였다. 앞에서 기술한 이론을 바탕으로 3차원 수중운동체의 충격력 계산 프로그램인 IMPACT3D가 작성되었으며 이 프로그램의 구조도는 다음과 같다.



수중운동체로서 반구(半球)의 앞부분을 잘라내서 평면 두부형상을 갖는 선수 형상 2가지를 채택하였다. 즉, 반경의 30%를 잘라낸 두부형상(球의 중심으로부터 선수까지의 거리 $X_{FS}=0.7$), B1과 반경의 70%를 잘라낸 두부형상($X_{FS}=0.3$), B2에 대해서 부가질량을 계산하고 이에 대한 z방향 미분을 취함으로써 충격력을 얻게 된다. 충격력 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_{vs} = F_v / \left(\frac{\rho}{2} \pi R^2 V^2 \right)$$

$$C_{hs} = F_h / \left(\frac{\rho}{2} \pi R^2 V^2 \right)$$

여기서, F_v : 수직충격력

F_h : 수평충격력

ρ : 물의 밀도

R : 물체의 반지름

V : 물체의 속도

수렴도를 조사하기 위하여 침수표면을 불연속이 없는 2~3부분으로 나누어 각 부분을 원주방향의 요소 i 개, 연직방향의 요소 j 개로 분할하여 계산을 수행하였다. 이 결과는 Fig. 2, 3에 보여지고 있으며, 여기서 z 는 R 로 무차원화된 것이다. 연직방향 충격력의 경우 i 와 j 를 동시에 증가시킨 결과가 i 와 j 를 각각 따로 증가시킨 결과 사이에 들어가는 것을 볼 수 있으나 수평 방향 충격력의 경우 i 와 j 를 동시에 증가시킨 결과는 i 와 j 를 각각 따로 증가시킨 것과 상당한 차이를 보이고 있다. 이 그림에서 α 는 수중운동체의 자세각(물체중심선과 수직축의 사이각)이고, β 는 속도 벡터의 각도(수직축과의 사이각)를 나타낸다. 입수각도에 따른 충격력의 경향을 관찰하기 위하여 B2($X_{fs} = 0.3$)에 대한 결과를 Fig. 4, 5에 보여주고 있다. 이 결과는 $i=20, j=20$ 으로 계산하였다. 이 결과로부터 입수각 10° 에서의 연직충격력은 입수각 50° 에서의 연직충격력의 약 7배에 달하지만 수평충격력은 약 절반정도되는 것을 볼 수 있다. 수직 충격력의 절대크기가 수평충격력보다 훨씬 크기 때문에 입수각 10° 에서의 전체 충격력은 50° 에서의 충격력에 비해서 약 5배가 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 입수각이 10° 인 경우 두부형상 B2($X_{FS}=0.3$)의 두부평면 면적이 B1의 1.78배이지만, B2의 연직충격력은 B1의 3.38배에 이르는 것을 알 수 있다. 즉, 평면면적의 증가율보다 충격력 증가율이 더 큰 것을 알 수 있다.

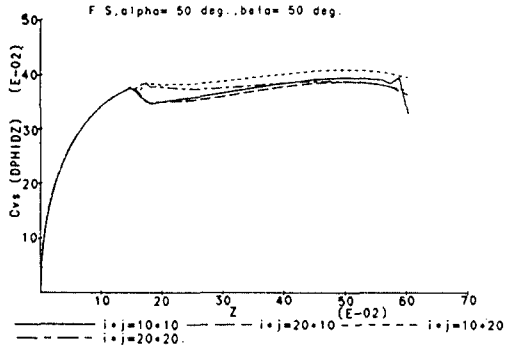


Fig. 2 Convergence test for the vertical impact forces of B1($X_b=0.7$)

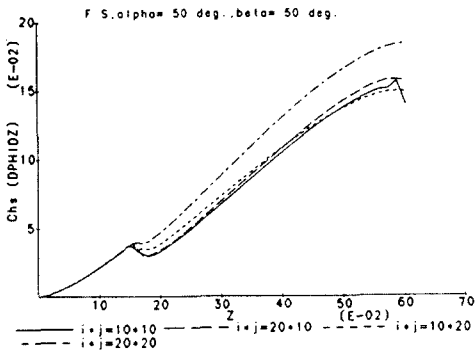


Fig. 3 Convergence test for the horizontal impact forces of B1($X_b=0.7$)

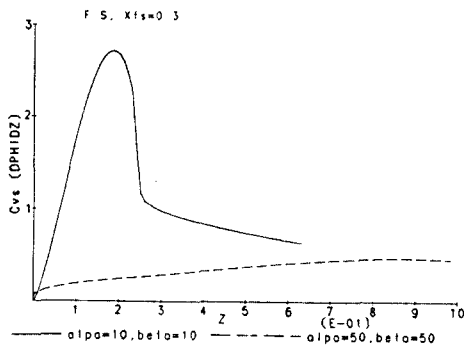


Fig. 4 Vertical impact forces for B2($X_b=0.3$)

5. 결론

본 연구의 결과 수중운동체의 항공기 투하시 수면진입 순간의 충격력 예측을 할 수 있는 IMPACT3D를

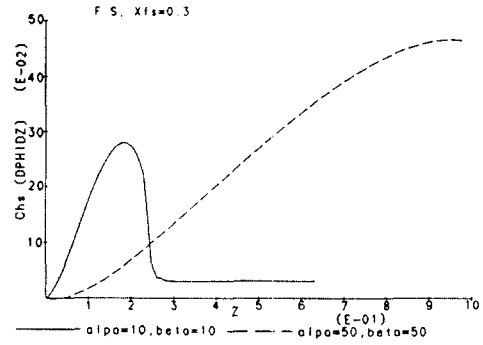


Fig. 5 Horizontal impact forces for B2($X_b=0.3$)

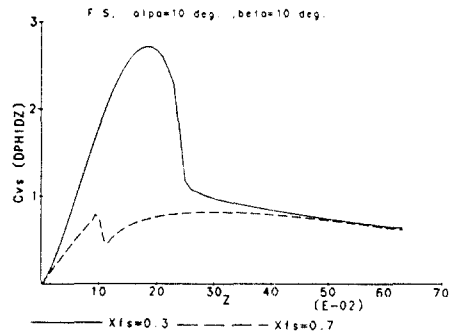


Fig. 6 Vertical impact forces for B2($X_b=0.3$) and B1($X_b=0.7$)

개발하였다. 이 프로그램은 앞부분이 납작한 부분 (flap part)을 포함하는 물체가 수직이나 입사각을 갖고 입수할 때의 충격력을 계산할 수 있다. 이 프로그램을 이용하여 2가지 수중운동체에 대한 입수시 두부충격력 계산 및 검토를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 수렴도 검토결과로부터 충격력 계산시 $i=20$, $j=20$ 이상이 바람직하다.
- (2) 입수각에 따라 충격력이 급격하게 변화하며 10° 입수각에서의 충격력은 50° 입수각에서의 충격력의 5배가 된다.
- (3) 입수각이 작을 경우 수중운동체의 두부평면 면적의 증가율이 충격력 증가율보다 더 크기 때문에 평면 면적이 증가함에 따라 충격력이 급격히 증가한다.

앞으로 입수시 충격량 실험을 수행하여 계산 결과와 비교함으로써 IMPACT3D를 검증할 수 있으며, 이를 개량함으로써 수중운동체의 선수형상 설계 기술고도화 및 진입후 수중에서의 초기운동 상태변수를 결정하기 위한 정밀자료의 확보가 가능할 것이다.

후 기

본 연구의 수행을 도와주신 진해기계창 박성희박사와 여러분에게 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Belik, O., Bishop, R.E.D., Price, W.G., "A Simulation of Ship Responses Due to Slamming in Irregular Head Seas", *RINA*, Vol. 124, 1982.
- [2] Chuang, S.L., "Theoretical Investigations on Slamming of Cone-Shaped Bodies", *Journal of Ship Research*, Vol. 13, No. 4, 1969.
- [3] Ferziger, J.H., *Numerical Methods for Engineering Application*, John Wiley and Sons, Inc., 1981.
- [4] Forbes, L.K., "An Algorithm for 3-Dimensional Free-Surface Problems in Hydrodynamics", *Journal of Computational Physics* 82, pp.330-347, 1989.
- [5] Gallagher, P. and McGregor, R.C., "Slamming Simulations: An Application of Computational Fluid Dynamics", *Fourth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, Washington, D.C., 1985.
- [6] Gradsteyn, I.S. and Ryzhik, I.M., *Table of Integrals, Series, and Products*, Academic Press, 1980.
- [7] Greenhow, M., "Wedge Entry into Initially Calm Water", Marintek, Report No. OR 530030.12, Trondheim, Norway, 1986.
- [8] Kang, C.-G. and Gong, I.-Y., "A Numerical Simulation of Three-Dimensional Non-linear Free Surface Flows", *대한조선학회 논문집*, vol.28, No.1, 1991.
- [9] Miloh, T., "Wave Slam on a Sphere Penetrating a Free Surface", *Journal of Engineering Math.*, Vol. 15, No. 3, pp. 221-240, 1981.
- [10] Newman, J.N., *Marine Hydrodynamics*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1977.
- [11] Ochi, M.K. and Motter, L.E., "Prediction of Extreme Values of Impact Pressure Associated with Ship Slamming", *Journal of Ship Res.*, Vol. 13, No. 2, 1969.
- [12] Ochi, M.K. and Motter, L.E., "Prediction of Slamming Characteristics and Hull Responses for Ship Design", *SNAME Transactions*, pp. 144-176, 1973.
- [13] Oliver, J.C., "Advanced Method for Ship Motion and Wave-Load Predictions", Ship Structure Committee Project, SR 1277, Giannotti and Assoc., Annapolis, Maryland, 1983.
- [14] Payne, P.R., "The Vertical Impact of a Wedge on a Fluid", *Ocean Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 421-436, 1981.
- [15] Sarpkaya, T. and Isaacson, M., *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*, Van Nostrand Reinhold Co., New York, New York, 1981.
- [16] Shiffman, M. and Spencer, D.C., "The Force of Impact on a Cone Striking a Water Surface", *Comm. Pure Appl. Math.*, Vol. 4, pp. 379-417, 1951.
- [17] Troesch, A.W., and Kang, C.-G., "Hydrodynamic Impact Loads on Three-Dimensional Bodies", *16th Symp. on Naval Hydro.*, Berkeley, 1986.
- [18] Troesch, A.W., and Kang, C.-G., "Evaluation of Impact Loads Associated with Flare Slamming", *STAR Symp.*, Pittsburgh, 1988.
- [19] von Karman, T., "The Impact on Seaplane Floats During Landing", *NACA TN* 321, 1929.
- [20] Wagner, H., "Landing of Seaplanes", *NACA TN* 62, 1931.
- [21] Yamamoto, Y., Fujino, M., and Fukasawa, T., "Motion and Longitudinal

- Strength of a Ship in Head Seas and the Effects of Nonlinearities". *Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 18, Soc. of Nav. Arch. of JAPAN, 1980.
- [22] Yim, B., "Numerical Solution for Two-Dimensional Wedge Slamming With a Non-linear Free-Surface Condition", *Fourth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, Washington, D.C., 1985.
- [23] Zhao, R. and Faltinsen, O., "Water Entry of Two-Dimensional Bodies", *JFM*, vol. 246, 1993.
- [24] Barsky, B.A. & Greenberg, D.P., "Determining a Set of B-Spline Control Vertices to Generate an Interpolating Surface", *Computer Graphics and Image Process* 14, pp. 203~226, 1980.
- [25] Barsky, B.A., "End Conditions and Boundary Conditions for Uniform B-Spline Curve and Surface Representations", *Computers in Industry* 3, pp. 17~29, 1982.