

원통형 실린더의 입수 충격 해석

The Impact Analysis for Water-Entry of Cylindrical Body

독고 옥†

Dokko, Wook

김 인 학*

Kim, In-Hack

(논문접수일 : 1999년 12월 1일 ; 심사종료일 : 2002년 1월 13일)

요 지

물체가 수중에 입수할 때, 원래의 운동에너지는 물체와 그 주위의 물에 부가질량 형태로 분배된다. 이러한 에너지 혹은 운동량의 전달에 기인하여 물체는 유체동력학적 충격력과 가속도를 받는다. 이러한 충격거동은 수중운동체의 공중 발사에 중요한 고려 요인이 된다. 본 논문에서는 구멍정 모델을 바탕으로 원통형 물체의 입수에 대한 충격거동을 해석하는 근사기법을 제안하였다. 충격력은 von Karman의 운동량 이론으로 계산하고, 운동, 특히 가속도는 유체동력학적 힘의 평형에 의하여 유도된 운동방정식의 수치 적분으로 계산하였다. 제안된 방법은 입수충격을 받는 물체의 초기설계나 운동 해석을 위한 단순하면서도 효과적인 방안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 입수, 모멘텀 이론, 충격력, 구멍정 모델

Abstract

When a body enters water, its original kinetic energy or momentum is distributed among the body and surrounding water in the form of added mass. Due to the transfer of the energy or momentum, the body is subjected to the hydrodynamic impact forces and acceleration. This impact behavior can be an important criterion of submersible vehicle launched to the air. In this paper, based on Life-boat model, an approximate method is proposed for the evaluation of the forces and responses of cylindrical rigid body by water entry impact. The impact forces are calculated by von Karman's momentum theory and motion responses of the body, especially acceleration, are calculated by a numerical integration of the motion equations derived by hydrodynamic force equilibrium. The proposed method is expected to be a simple but efficient tool for the preliminary design or motion analysis of a body subjected to water entry impact.

Keywords : Water entry, Momentum theory, Impact force, Life-boat model

1. 서 론

물체가 자유수면을 통과하여 수중으로 입수할 때 물체의 운동에너지가 물에 전달되는 과정을 통하여 물체에 충격이 가해지고 감속 운동이 발생된다. 이러한 충

격은 구조적 기능 손상을 초래할 수 있다. 따라서 내충격 설계를 위해서는 충격량 예측과 충격을 최소화할 수 있는 입수조건 설정에 대한 연구가 필요하다.

입수 충격 문제는 1929년 von Karman에 의하여 처음 정식화되었다.¹⁾ Karman의 모멘텀 이론에 따르면,

† 책임저자, 정회원 · 국방과학연구소 선임연구원
전화: 055-540-6321; Fax: 055-542-3737
E-mail: wdokko@add.re.kr

* 국방과학연구소 선임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 6월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

몸체가 입수할 때 그 모멘텀의 일부가 주위의 물에 분배되어 그 전달율에 의하여 충격력이 산정될 수 있고, 썩기 형상 물체의 부가질량(added mass)은 같은 길이와 폭을 갖는 평판의 그것과 같다. 이러한 근사는 적절한 수정을 통하여 임의의 입수각을 갖는 실린더형 물체에도 적용될 수 있다.

이후에 Karman의 부가질량 개념을 이용하여 여러 개선된 연구가 있었으나, 원뿔²⁾이나 썩기³⁾의 2차원 입수문제가 대부분을 차지하였다. 조선 및 해양 분야에서는 슬래밍 문제를 해결하기 위하여 포텐셜 유동에 의한 2차원 스트립 이론이나 단순화된 자유표면 조건을 해석한 연구가 주류를 이루어 왔으며, 강⁴⁾은 이러한 접근방법을 평평한 면을 갖는 실린더의 입수 문제에 적용한 바가 있다. 최근에는 박⁵⁾이 Navier-Stokes 방정식과 유한체적법에 의한 경계면 구현을 통하여 좀더 개선된 방법을 제안하여 공동 현상까지를 고려한 비정상 유동장 해석을 수행하였다. 또한, 무기체계 분야에서 실험 및 경험 요소들을 활용하여 입수나 출수 현상을 해석한 예가 있다.⁶⁾

입수 문제에 대한 또다른 시도로서 구멍정의 자유낙하 진수시에 선체가 받는 충격 거동에 대한 연구가 있다. Nelson⁷⁾, Tasaki 등⁸⁾, Boef⁹⁾ 및 Arai¹⁰⁾는 선체의 입수 과정에 대한 수학적 모델을 만들고 모멘텀 이론을 근거로 충격력을 계산하였다.

본 연구에서는 Boef와 Arai의 해석모델을 바탕으로 앞면이 평평한 원통형 실린더의 입수에 의한 충격과 수중 운동을 해석하는 근사기법을 제안하였다. 이 과정에서 물체 형상에 맞게 부가질량 계산을 수정하였고 잠긴 상태에 따라 저항 산정도 좀더 세분화하여 보완하였으며, 물체의 자세에 따라 좀더 기하학적 표현을 수정 보완하였다.

제안된 방법에 의한 결과를 유체 유동 해석에 의한 박의 결과 및 무기체계 개발과 관련된 미국 Honeywell 사¹¹⁾의 연구 결과 등과 비교하여 타당성을 검증하였다. 또한 입수충격 해석 및 설계를 위한 제안된 방법의 보완 및 시험평가의 필요성 등을 제안하였다.

2. 수학적 모델링

2.1 운동방정식

Fig. 1에서 보는 바와 같이 질량 M , 관성질량 모멘트 I , 길이 L 인 원통형 실린더가 각 θ 를 갖고 입수하는

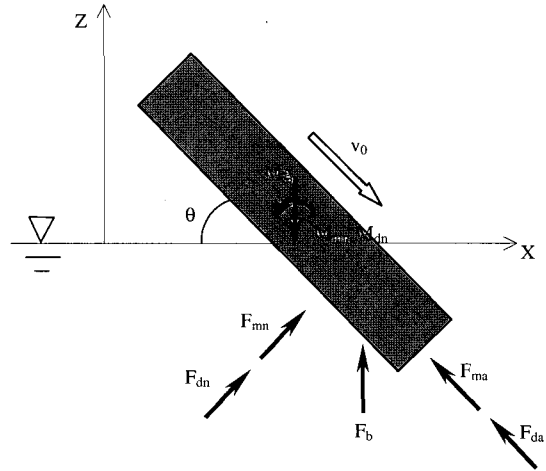


Fig. 1 Force equilibrium for water entry

경우에 실린더의 정적 혹은 유체동력학적 힘의 평형에 의한 운동방정식은 식(1a)-(1c)로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} M\ddot{x} = & F_{mn} \sin \theta - F_{ma} \cos \theta \\ & + F_{dn} \sin \theta - F_{da} \cos \theta \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} M\ddot{z} = & F_{mn} \cos \theta + F_{ma} \sin \theta \\ & + F_{dn} \cos \theta + F_{da} \sin \theta - Mg + F_b \end{aligned} \quad (1b)$$

$$I\ddot{\theta} = -M_{mn} - M_{dn} - M_b \quad (1c)$$

여기서, F_m 은 실린더에서 물로의 모멘텀 전달에 기인한 충격력을, F_d 는 저항 성분을 그리고 F_b 와 Mg 는 각각 부력과 중력 성분을 의미한다. 그리고 M_m , M_d 및 M_b 는 각각 충격력, 저항 및 부력 등에 의한 모멘트들을 나타내며, 두번째 아래첨자 a 와 n 은 실린더의 길이 방향과 그에 수직 방향의 성분을 나타낸다. 이상의 여러 힘 성분들에 대한 수학적 표현은 뒤에서 자세히 기술된다.

위의 과정에서 실린더가 직경에 비해 길이가 긴 날렵한 경우를 고려하여 실린더가 입수할 때 물을 튀기거나 파도를 생성시키는 에너지에 의한 성분은 고려하지 않았다. 이런 효과는 입수 속도가 클수록 상대적으로 줄어들 것으로 예상되어 고속 입수 문제에서는 유효하다고 판단하였다. 또한 대기압 효과나 캐비테이션 현상도 무시하였다.

위의 운동방정식에서 힘 성분들은 변위, 속도, 가속

도 등의 함수로 표현되며 이를 정리하면 연성된 비선형 미분방정식이 된다. 비선형 미분방정식을 풀기 위해 Runge-Kutta의 4차 방법을 사용하였다.

2.2 기하학적 모델

Fig. 2는 좌표계와 입수 상태의 기하학적 표현 인자들을 설명하고 있으며, 실린더가 좌우 대칭인 경우에는 단면 형상을 고려한 2차원 문제로 귀결된다. 수면을 X 축으로 하고 그에 수직인 축을 Z 축으로 하여 전체 좌표계로 잡는다. 그리고 무게중심 G 를 원점으로 하여 길이 방향을 ξ 축, 반경 방향을 ζ 축으로 하여 국부 좌표계를 잡는다.

전체 좌표계의 z 값은 수면에서의 G 의 위치를 나타내며, 입수각 θ 는 X 축에 대한 ξ 축의 시계방향 회전을 양의 값으로 한다. $h(\xi)$ 는 입수 상태를 나타내는 인자로서 실린더의 단면이 길이에 수직인 방향(반경 방향)으로 잠긴 깊이이고, l 은 단면이 $h(\xi)$ 만큼 잠겼을 때 단면 중심선이 길이 방향으로 잠긴 길이를 나타낸다.

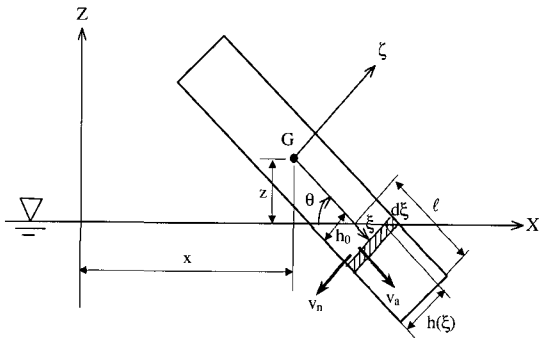


Fig. 2 Geometry model of water entry

3. 충격 해석

입수시 실린더에 작용하는 정적 혹은 동적 하중들 중에서 부력, 길이 방향에 수직하게 작용하는 저항 성분 및 모멘텀 전달에 의한 힘 등은 strip 모델을 적용하여 계산된다.

모멘텀 전달에 의한 힘은 모멘텀 이론, 부가 질량 및 충격의 비가역 성질 등을 기초로 정식화된다.

3.1 모멘텀 이론

입수 전의 속도가 v_0 인 질량 M 의 물체가 입수 후에

속도가 $v(t)$, 혹은 $v(z)$ 가 된다면 모멘텀 보존에 의하여 식(2)가 성립한다.

$$M \cdot v_0 = [M + m(t)]v(t) = [M + m(z)]v(z) \quad (2)$$

여기서 침수 깊이 z 는 시간 t 에 대한 양의 단조(positive monotonic) 함수이며, 부가질량 $m(z)$ 는 침수깊이의 함수로서 물체에 유체동력학적 관성으로 작용한다. 이때 물체의 모멘텀 감소율은 물에 전달되는 그것과 같으며, 충격력은 실린더가 가지는 모멘텀의 시간 변화율로 정의된다.

$$F_{impact}(t) = \frac{d}{dt}[Mv(t)] = -\frac{d}{dt}[m(t)v(t)] \quad (3)$$

3.2 길이방향에 수직한 충격력 해석

Fig. 2에서 보는 바와 같이 위치 ξ 에서 길이 $d\xi$ 를 갖는 미소 단면에서 모멘텀 전달에 의한 힘은 식(4)로 주어진다.

$$\begin{aligned} dF_{mn} &= \frac{d}{dt}[m_n(\xi, h) \cdot v_n(\xi)]d\xi \\ &= \left[\frac{dm_n}{dt} v_n + m_n \frac{dv_n}{dt} \right] d\xi \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 부가질량의 시간 변화율 dm_n/dt 은 식(5)로 되는데, 실린더가 떠오르는 중에는 dm_n/dt 가 음의 값을 갖는다.

$$\frac{dm_n}{dt} = \frac{\partial m_n}{\partial h} \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

이것은 물에 전달되었던 모멘텀이 다시 실린더에 회수되는 것을 의미하나, 비가역 성질에 의해 실제로 이런 현상은 발생하지 않으며, 따라서 v_n 이 음의 값을 가지는 경우에는 $dh/dt=0$ 으로 가정한다.

길이에 수직한 방향의 속도 $v_n(\xi)$ 는 식(6)과 같고,

$$v_n(\xi) = -\dot{x} \sin \theta - \dot{z} \cos \theta + \xi \dot{\theta} \quad (6)$$

이를 식(4)에 대입하여 전체 길이에 대해 적분하면 충격력과 그 모멘트는 다음과 같다.

$$F_{mn} = (-\dot{x}\sin\theta - \dot{z}\cos\theta) \int \frac{dm_n}{dt} d\xi + \dot{\theta} \int \frac{dm_n}{dt} \xi d\xi + \ddot{\theta} \int m_n \xi d\xi - (\ddot{x}\sin\theta + \ddot{z}\cos\theta + 2\dot{\theta}v_a) \int m_n d\xi \quad (7a)$$

$$M_{mn} = (-\dot{x}\sin\theta - \dot{z}\cos\theta) \int \frac{dm_n}{dt} \xi d\xi + \dot{\theta} \int \frac{dm_n}{dt} \xi^2 d\xi + \ddot{\theta} \int m_n \xi^2 d\xi - (\ddot{x}\sin\theta + \ddot{z}\cos\theta + 2\dot{\theta}v_a) \int m_n \xi d\xi \quad (7b)$$

3.3 길이 방향의 충격력

길이 방향의 속도와 가속도는 무게중심에서의 값을 사용하며, 길이방향의 속도 v_a 는 식(8)로 된다.

$$v_a = \dot{x}\cos\theta - \dot{z}\sin\theta \quad (8)$$

L_f 가 실린더 앞단 끝에서 무게중심까지의 거리이고 $m_a(l)$ 이 축방향 부가질량인 경우에, 길이방향 충격력은 식(9)로 되고,

$$F_{ma} = (\ddot{x}\cos\theta - \ddot{z}\sin\theta + \frac{1}{2}L_f\dot{\theta}^2) \times m_a(l) + \frac{dm_a}{dl} \frac{dl}{dt} v_a \quad (9)$$

마찬가지로 v_a 가 음이면 dl/dt 는 0이다.

3.4 침수량 및 부가질량의 계산

침수 깊이 $h(\xi)$ 는 Fig. 2에 의하여 식(10)으로 되고,

$$h(\xi) = [-z + \xi\sin\theta] / \cos\theta + r \quad (10)$$

길이에 수직인 방향에 대한 부가질량은 다음의 관계로 표현된다¹⁰⁾.

$$m_n(\xi, h) = \begin{cases} \pi\rho c^2(\xi, h)/2 & \text{if } h(\xi) < r \\ \pi\rho c_m^2(\xi, r)/2 & \text{if } h(\xi) \geq r \end{cases} \quad (11)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도를 r 은 실린더 단면의 반경을

나타내며, $c(\xi, h)$ 는 침수깊이 h 인 단면의 접수면의 반폭을 그리고 $c_m(\xi, r)$ 는 접수면 폭이 최대인 경우의 값으로 원단면의 경우에는 $h=r$ 이다.

길이방향의 부가질량은 2단계로 나누어 계산된다. 먼저 앞면이 입수되는 동안에는 앞면이 완전히 잠긴 경우의 원판의 부가질량식(12)에 의하여 앞면 전체의 값에 대한 침수된 면적의 비율로 계산한다¹²⁾. α 는 앞면 전체의 값에 대한 침수된 면적의 비율로 계산한다.

$$m_1 = \frac{8}{3}\rho r^3 \cos^2\alpha \quad (12)$$

앞면 입수가 끝난 이후에는 타원체의 부가질량 모델이 적용되어 장축 방향의 부가질량 m_e 는 식(13)과 식(14)로 계산되고,

$$m_e = km_0 \quad (13)$$

$$m_0 = \frac{4}{3}\pi\rho a_e b^2 \quad (14)$$

이때 a_e 는 단면 반경을 b 는 길이의 반(장축 반경)을 의미하고 k 는 a_e 와 b 에 의해 결정되는 기하학적 계수이다¹³⁾. 이 식에 의하여 실린더의 잠긴 길이에 따른 부가질량은 식(15)로 계산된다.

$$m_a(l) = \begin{cases} m_e \{2(l/L)^3 - 4(l/L)^2 + 5(l/L)/2\} & \text{if } l < L/2 \\ m_e/2 & \text{if } l \geq L/2 \end{cases} \quad (15)$$

그런데 Arai 논문에서는 침수 길이 l 이 실린더의 자세에 상관없이 하나의 식으로 정의하였지만, 본 연구를 통해 자세에 따라 다르게 정의됨을 확인하였다. 그 결과 실제로 의미가 있는 세가지 상태로 구분하였다. 여기서 L_f 는 실린더 앞쪽에서 무게중심 G까지의 길이이다.

$$l = \begin{cases} -z/\sin\theta + L_f & \text{if } 0 < \theta \leq \pi/2 \\ z/\sin\theta - L_f + L & \text{if } -\pi/2 \leq \theta < 0 \\ L & \text{if } \theta = 0 \end{cases} \quad (16)$$

4. 유체력 및 운동방정식

4.1 부력

부력과 그 모멘트는 단면적의 적분에 의하여 계산되며, 이때 $A_{wet}(\xi)$ 는 좌표 ξ 에서의 단면의 침수면적이다.

$$F_b = \rho g \int A_{wet}(\xi) d\xi \quad (17)$$

$$M_b = \rho g \cos \theta \int A_{wet}(\xi) \xi d\xi \quad (18)$$

4.2 유체동력학적 저항

유체동력학적 저항은 cross-flow 원리에 의하여 직교 방향에 대하여 독립적으로 산정하며, Morison 방정식에 의하여 계산하였다. F_{da} , F_{dn} 및 M_{dn} 은 각각 길이 방향의 저항, 수직방향의 저항 및 그 모멘트를 의미한다. 또한 C_{da} 와 C_{dn} 은 각각 길이 방향과 수직방향에 대한 저항계수이고, D 는 단면의 직경, A_m 은 침수부분의 최대 단면적이다.

$$F_{da} = \frac{1}{2} \rho C_{da}(l, D, \theta) A_m v_a |v_a| \quad (19)$$

$$F_{dn} = \frac{1}{2} \rho C_{dn} \int D v_n |v_n| d\xi \quad (20)$$

$$M_{dn} = \frac{1}{2} \rho C_{dn} \int D v_n |v_n| \xi d\xi \quad (21)$$

C_{dn} 은 단면 형상으로 결정되는 압력저항에 주로 기인하며, 2차원 실험결과를 적용하였다. C_{da} 는 앞단 압력, 끝단 압력 그리고 표면 마찰 등으로 구성되며, 여기서는 Hoerner가 제시한 값들을 채택하였다¹⁴⁾. 입수 중에는 앞단 저항과 침수 길이 만큼의 마찰을, 전체가 잠긴 경우에는 세가지 성분 모두를 그리고 앞단이 부상된 경우에는 끝단 압력과 마찰이 작용하는 것으로 가정하였다.

4.3 운동 방정식

이상의 과정에서 부가질량과 여러 힘들을 식(1)의 평형방정식에 대입하여 정리하면 식(22)의 x , z , θ 에

대한 연성된 2차의 미분방정식이 된다.

$$\begin{bmatrix} M+m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & M+m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & I+m_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{Bmatrix} \quad (20)$$

여기서 m_{ij} 는 부가질량에 의한 관성항들이고 I 는 실린더의 질량관성 모멘트, f_i 는 중력, 부력 및 저항 등으로 이루어진 항들이다.

윗식에 의해 구해진 응답에 의하여 국부좌표계에 대한 충격력 및 가속도를 계산할 수 있으며, 임의의 위치에서의 가속도 성분은 다음과 같다.

$$a_\xi(\xi, \zeta) = \ddot{x} \cos \theta - (\ddot{z} + g) \sin \theta - \zeta \ddot{\theta} + \xi \dot{\theta}^2 \quad (23)$$

$$a_\zeta(\xi, \zeta) = \ddot{x} \sin \theta + (\ddot{z} + g) \cos \theta + \xi \ddot{\theta} + \zeta \dot{\theta}^2 \quad (24)$$

5. 결과 및 고찰

먼저 결과의 타당성을 확인하기 위하여 유사한 모델에 대하여 박과 Honeywell의 연구 결과와 비교하였으며, 참고로 박의 연구는 아직 그 신뢰성이 완전히 입증된 상태는 아니다. 입수조건은 $\theta=80^\circ$, $v_0=53 \text{ kts}$ 로 동일하나, 실린더 모델은 약간씩 차이가 존재한다. 제안된 방법 및 다른 두가지 방법의 모델은 최대 직경은 0.324m로 동일하나, 박과 Honeywell의 모델은 앞단면, 두부(nose)의 직경이 0.324mm보다 작아서 모서리부가 곡선부를 이루며, 일정길이(0.2-0.3m) 이후에 균일 단면이 되는 형상이다(Fig. 3). 길이는 약 2.7m이고 무게중심은 앞단에서 약 1.38m이다. 그리고 모델의 전체 중량은 280kg이고 Honeywell의 모델은 중량이 약 240kg 정도로 약 40kg이 가벼우며, 박의 모델은 실린더를 유체장에서의 하나의 경계면으로 보기 때문에 중량의 개념은 없다. 본 논문에서는 입수 초기만을 검토 대상으로 하기 때문에 기타 제원은 생략하기로 한다.

박의 기본적인 계산 결과는 압력으로 나타나며, 충격력은 입수된 면적에 대한 압력의 단순 합으로 구하였다. 계산된 압력의 최대값은 Honeywell의 그것과 비교적 잘 일치함을 먼저 확인하였다. 제안된 방법의

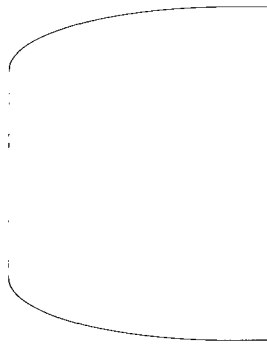


Fig. 3 The nose configuration of example model

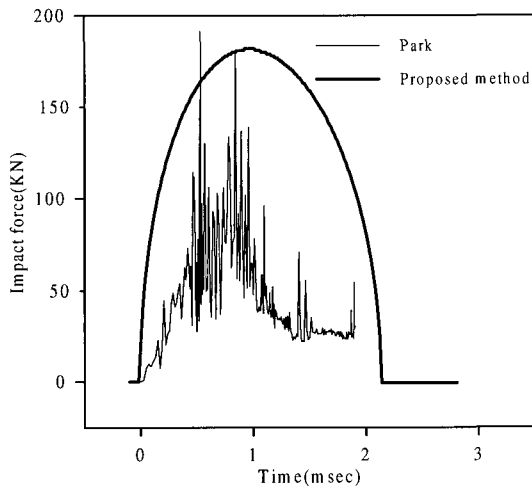


Fig. 4 Results of impact forces

하여 계산된 충격력과 가속도를 박의 충격력 결과와 Honeywell의 최대 가속도값과 각각 비교하였다.

Fig. 4는 충격력 결과를 박이 입수면적에서의 압력 함으로 계산한 결과와 비교한 것으로 대략적인 경향은 유사하나, 해석 방법 및 모델링의 차이로 인하여 최대 값의 크기나 지속 형태가 다르고 전체 충격 에너지의 크기는 상당한 차이가 있다. 따라서, 이 결과를 통하여는 상호 정성적인 경향 및 정량적인 차이점에 대한 확인으로 만족해야 할 것 같다. Fig. 5는 입수각에 따른 가속도 값을 Honeywell의 결과와 비교한 것으로 Honeywell에 비하여 비교적 큰 값을 주는 것으로 나타나는데, 이

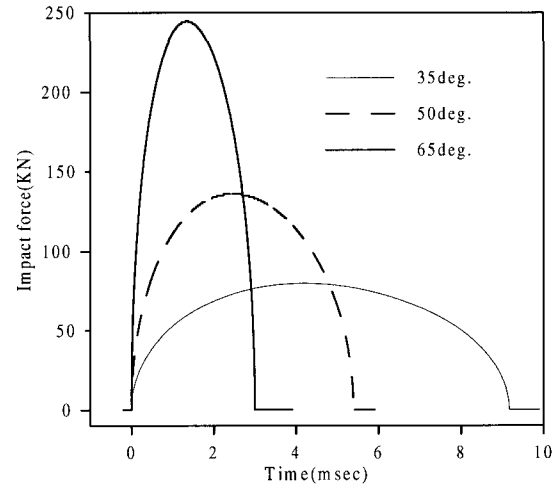


Fig. 6 Axial impact forces according to entry angles for entry velocity of 100kts(51.44m/s)

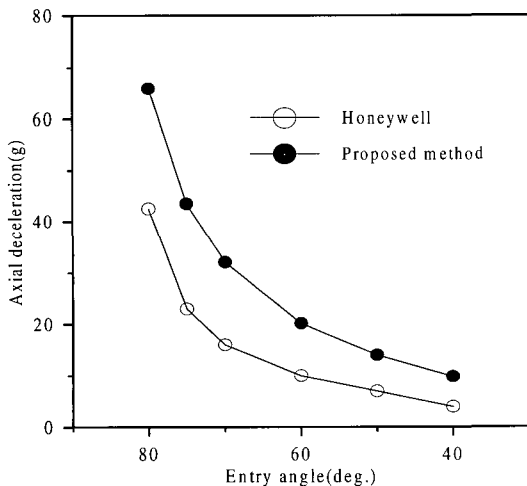


Fig 5. Axial decelerations according to entry angles

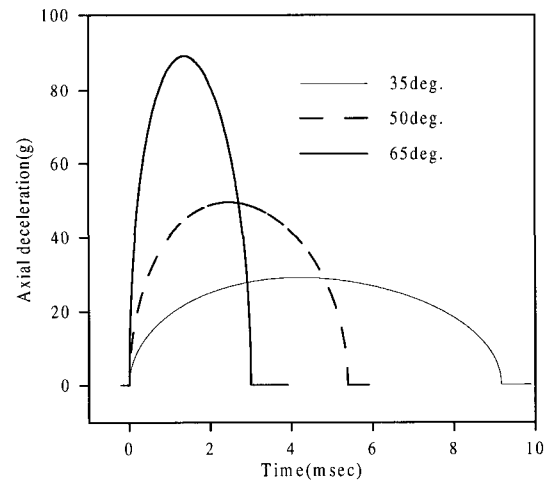


Fig. 7 Axial decelerations according to entry angles for entry velocity of 100kts(51.44m/s)

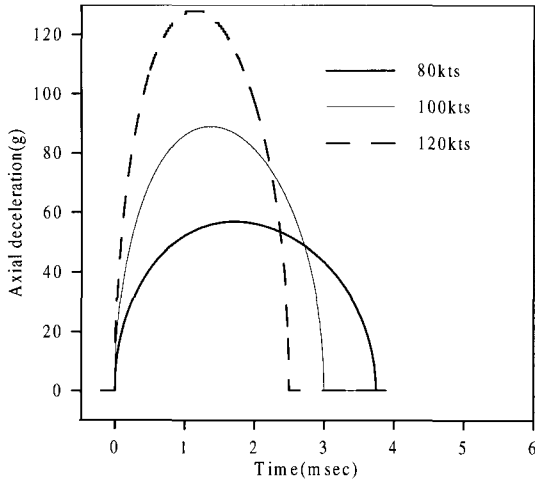


Fig. 8 Axial decelerations according to entry velocities for entry angle of 65deg.

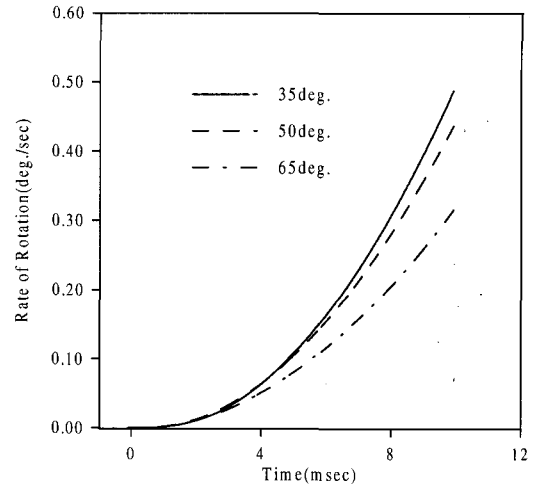


Fig. 9 Pitch-up angle rates according to entry angles for entry velocity of 100kts(51.44m/s)

는 노우즈부의 변단면을 고려하지 않은 것에도 상당히 영향이 있는 것으로 판단되며, 노우즈 형상 모델링 보완을 통하여 개선될 수 있을 것으로 생각된다. Fig. 6 과 Fig. 7은 각각 입수각에 따른 충격력 및 가속도 결과를, Fig. 8은 입수속도에 따른 가속도 결과를 보여 준다. 입수각이나 입수 속도가 증가함에 따라 충격량이 더 급속하게 증가하며, 반대로 지속시간은 더 빨리 감소한다. 따라서 물체의 충격 설계 사양에 따라 적절한 입수속도와 입수각에 대한 선택이 필요할 것이다. Fig. 9는 입수각의 변화율을 나타낸 것으로 입수 초기에는 입수각의 변화가 거의 없으며, 이는 축방향 충격력이나 관성에 비하여 길이에 수직 방향으로의 충격 성분이 상대적으로 미미한 때문으로 판단된다.

6. 결 론

유사한 문제에 대한 검증된 연구 사례가 충분치 못한 관계로 제안된 방법의 결과에 대한 정량적인 정확성을 결론 내리기는 어려우나, 제안된 방법이 초기설계 단계에서 입수에 의한 충격량을 해석하는 간편하면서도 효과적인 방안이 될 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구결과는 완전히 입수된 후의 운동 및 여러 유체력까지도 함께 해석할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 노우즈의 형상 변화가 고려되지 못한 관계로 정확한 결과 비교는 미흡하며, 현재 이에 대한 보완 해석이 진행 중이다. 또한, 아직 공식적으로 검증되지 않은

박⁵⁾의 연구 결과와도 서로 비교 검토하는 단계인지라 그 정확성에 대한 확실한 검증에는 한계가 있는 것도 사실이다.

추후에 노우즈 부분의 정확한 형상 모델 보완과 더불어 실험이나 DYTRAN과 같은 상용 소프트웨어에 의한 해석이 필수적으로 요구될 것으로 생각된다. 이들 결과와의 비교 분석이 이루어진다면 제안된 방법의 신뢰성에 대한 좀더 분명한 검증이 가능할 것으로 기대된다. 이상의 연구가 뒷받침된다면 복잡한 유체 유동 해석이 없더라도 입수충격에 의한 물체의 내충격 초기설계가 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. von Karman, T., "The Impact on Seaplane Floats during Landing", NACA TN 321, 1929
2. Shiffman, M & Spencer, D. C., "The Force of Impact on a Cone Striking a Water Surface(Vertical Entry)", *Comm. Pure Appl. Math.*, Vol. 4, 1951
3. Payne, P. R., "The Vertical Impact of a Wedge on a Fluid", *Ocean Engineering*, Vol. 8, No. 4, 1981
4. Kang, ChangGu, "Analysis of Impact Forces Acting on a Flat Faced Body Entering Water", *Transactions of the Society of Naval Architects of*

- Korea*, Vol. 31, No. 2, May 1994
5. 박정기, "비정상 점성유동 해석을 통한 경어뢰의 입수충격 및 공동현상 연구", 승격심사논문, 국방과학연구소, 1997
 6. May, A., "Vertical Entry of Missile into Water", *J. of Appl. Phy.*, Vol. 23, No. 12, 1952
 7. Nelson, J. K., Hirsch, T. J. & Magill, J. M., "Measured Accelerations on Free-Fall Lifeboats", *Trans. ASME*, Vol. 100, 1988
 8. Tasaki, R., Ogawa, A. and Tsukino, Y., "Numerical Simulation and Its Application on the Falling Motion of Free-Fall Lifeboats", *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 167, 1990
 9. Boef, W. J. C., "Launch and Impact of Free Fall Lifeboats. Part I. Impact Theory", *Ocean Engineering*, Vol. 19, 1992
 10. Arai, M., "Water Entry Simulation of Free-fall Lifeboat", *Journal of The Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 178, 1995
 11. Potter, A. F., *Water Entry Tests for Torpedoes*, Honeywell Inc., 1983
 12. Lamb, H., *Hydrodynamics*, Cambridge University Press, 1975
 13. Fossen, T. T., *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons, 1994
 14. Hoerner, S. F., *Fluid-Dynamic Drag*, Hoerner Fluid Dynamics, N.J., 1965