

고속으로 입수하는 물체에 대한 충격량 해석

○ 김 영 우¹⁾, 박 원 규²⁾, 김 찬 수³⁾

ABSTRACT

The numerical methodology for computing the impact forces of the water entry bodies has been developed. The present method assumed the impact occurs within a very short time interval and the viscous effects do not have time enough to play a significant role in the impact forces, that is, the flow around a water-entry object was assumed as an inviscid potential flow and is solved by the source panel method. The elements fully submerged into the water are routinely treated, but the elements intersected with the effective planar free surface are redefined and reorganized to be amendable to the source panel method. To validate the present code, it has been applied to disk and ogive model and compared with experimental data. Good agreement has been obtained.

1. 서론

입수하는 물체의 충격량 해석문제는 조선공학이나 해양공학과 같은 분야에서 여전히 관심을 가지고 있는 문제이다. 특히, 어뢰나 폭뢰와 같이 빠른 속도로 입수하는 물체를 설계하기 위해서는 입수시 충격량이나 그때의 모멘트 등이 비교적 정확하게 계산되어야 할 필요가 있다. 만약 빠른 속도로 입수하는 물체들이 잘못 설계된다면, 강한 충격력으로 인해 입수되는 과정에서 파괴되거나 정밀한 전기적 회로가 파손되는 현상 등의 문제점을 초래할 수 있기 때문이다.

입수 충격량 해석에 관한 연구는 1930년대 von Karman[3]과 Wagner[4]가 Added mass 개념과 선형화된 자유 표면 경계 조건을 사용하여 처음으로 시도되었는데 이 방법은 단순한 형상의 수직입수에 거의 국한되어 있었으며 Chu와 Falconer(1963)는 비선형 자유표면 효과를 다루기에 적합한 경계 조건을 얻기 위해 노력하였다. 또한 Shere와 Vander Vorst(1973), Vander Vorst 와 Rogers(1976)는 Marker-and-Cell(MAC)방법을 이용한 비압축성 Navier-Stokes Equation을 풀어서 원추 형상이 수직으로 입수할 때의 상세한 점성효과를 해석하였다. 그러나 이 방법은 두 가지 한계를 가지고 있었는데, 하나는 물체의 무게효과를 고려하지 않았던 것이고, 다른 하나는 이 해

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

가 물체 근처에서만 잘 맞는 경향을 가지고 있다는 것이었다.

한편 충격량 해석과는 별도로 입의 형상 주위의 3차원 포텐셜 유동장을 해석하기 위해 Hess와 Smith(1966)가 소오스 패널 기법(Source Panel Method)을 개발하였는데, 이 방법은 현재까지 항공·기계 분야 등에서 널리 적용되고 있다.

본 연구에서는 충격이라는 것이 물리적으로 매우 짧은 시간 내에 발생하는 현상이므로 점성에 의한 효과가 충격량에 큰 영향을 끼칠 만한 충분한 시간이 없다고 가정하여 물에 입수하는 물체 주위의 유동을 비점성 포텐셜 유동으로 가정하고 이를 해석하기 위해 소오스 패널 방법을 사용하였다. 유동을 위와 같이 가정한 것은 어떠한 물체가 정지상태에서 갑자기 움직이는 경우, 이 물체 주위의 유동은 처음 매우 짧은 시간동안 비점성 포텐셜 유동의 거동을 한다는 사실에 근거해 설득력을 지닐 수 있다.

2. 지배방정식과 경계조건

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

$$\text{지배방정식 : } \nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

경계조건 :

(a) 물체 표면에 대해 (Tangency flow condition)

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

(b) 유효 수면(z=0)에 대해

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

그리고 $\phi = 0$

여기서 ϕ 는 속도 포텐셜을 나타내고, \vec{V}_E 는 물체의 입수속도, \vec{e}_n 은 물체에 수직인 단위 벡터, \vec{V}_s 는 Waldraw(1977)에 의해 소개된 유효수면속도이며, \vec{V}_p 는 물체의 가장 깊은 곳의 속도를 의미한다. 이때 자유표면은 유효수면과 함께 표시되며, 그 위치는 h/h' 즉, wetting

factor C_w 로 정의가 된다. 그림 1은 지배방정식과 경계조건, wetting factor 등을 나타내는 개략도이다.

3. 수치적 방법

3.1 소오스 패널 방법 (Source Panel Method)

소오스 패널 방법(Hess and Smith, 1966)은 물체 표면을 여러 개의 요소로 나누어 그 요소의 도심에 같은 크기의 소오스 강도를 분포시켜 표현한다. 어떤 일정한 소오스 강도(σ)를 가지는 요소에 의해 유도된 속도 포텐셜은 해석적으로 다음과 같이 나타난다.

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

여기서 dA 는 요소의 표면적이고, (x_0, y_0, z_0) 는 요소의 도심의 좌표이며, (x, y, z) 는 구하고자 하는 ϕ 의 위치를 나타내는 좌표이다.

위 식 (4)를 식 (1)에 대입해 보면 식 (4)가 식 (1)의 해가 됨을 알 수 있고, 식 (1)은 선형 편미분 방정식이므로, ϕ 는 각 요소에 의해 생기는 속도 포텐셜을 중첩하여 얻을 수 있다. 각 요소의 소오스 강도로부터 유기된 속도는 물체 표면에서 경계조건 (2)를 만족해야 하므로, 모든 요소에 식 (4)를 적용하면 각각의 요소에 대해 1개의 방정식, 즉 N 개의 요소에 대해 N 개의 연립방정식이 얻어지며 우리가 구하고자 하는 것은 각 요소의 소오스의 강도, 즉 N 개의 미지의 소오스 강도이므로 본 문제를 해결할 수 있게 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 j 에서의 source 강도를 나타내고, \vec{e}_n 는 요소 i 에서의 바깥쪽의 단위 법선 벡터를 의미한다. 또한 $[A_{ij}]$ 는 요소 j 의 단위 소오스 강도에 의해 요소 i 에 유도되는 법선 속도의 행렬을 의미한다. 식 (5)을 풀어서 소오스 강도가 얻어진 후에는, 각 도심에서의 속도 포텐셜을 다음과 같은 식에서부터 구할 수 있다.

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

여기서 $[B_{ij}]$ 는 요소 j 의 단위 소오스 강도에 의해 요소 i 에 유도되는 속도 포텐셜의 영향행렬(Influence matrix)을 의미한다. 마지막으로 각 깊이에서의 표면압력계수는 다음과 같은 비정상 상태 베르누이 방정식에서 계산된다.

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

3.2 요소의 재정의

물체가 요소의 집합으로 표시되기 때문에, 처음에 물체에 고정된 좌표계 (x', y', z') 에 대해 요소를 생성하는 것이 필요하다. 각 요소를 정의한 후에는 각 요소의 도심에 소오스를 위치시킨다. 물체가 물 속에 단위 시간 별로 입수되면서 계산이 진행되는데 입수속도와 물체의 깊이는 매 단계마다 변한다. 입수가 진행될 때 요소는 다음과 같은 세 가지 상황에 처하게 되는데 우선 물 속에 완전히 잠긴 경우, 또는 수면에 의해 교차된 경우, 마지막으로 완전히 물밖에 있는 경우를 생각해 볼 수 있다. 현재의 소오스 패널 방법의 경우, 충격 해석시 완전히 물에 잠긴 부분만을 고려하기 때문에 물밖에 있는 요소는 계산에서 제외되고 수면에 의해 교차된 요소는 계산을 위해 재정의될 필요가 있다. 수면에 의해 교차된 요소는 그림 2에 나타나 있듯이, 절점중 하나가 물속에 잠겨 있는 경우와 둘, 셋이 잠겨 있는 경우로 나누어 생각해 볼 수 있다. 모든 경우에 대해 우선 두 개의 새로운 절점이 생성된다. 두 개의 절점중 수면 아래에 있는 절점의 좌표를 (x_1, y_1, z_1) 라하고 수면 위에 있는 절점의 좌표를 (x_2, y_2, z_2) 라 할 때, 수면 상에 새로 정의되는 절점의 좌표는 다음과 같은 식에 의해 결정이 된다.

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

이와 같은 방식으로 새로운 두 절점을 생성한 이후에, 만약 하나의 절점만이 물 속에 잠겨 있는 경우는 그림 2(b)에 나타나 있는 것처럼, 사각형을 얻기 위해 새로운 점이 하나 더 생성되어야

한다. 이 절점은 요소에서 수면을 따라 생성되는 선분을 이등분한 지점에 생겨난다. 만약 하나의 절점만이 수면 위에 있는 경우는, 그림 2(c)에 나타나 있는 것처럼 오각형이 생겨나기 때문에 수면과 마주보는 선분을 이등분한 지점에 또 하나의 절점을 위치시킨 후 오각형을 두 개의 사각형으로 나누어준다. 그로 인해 하나의 절점만이 수면 위에 있는 경우, 전체 요소의 수는 하나가 증가하게 된다.

3.3 표면 압력계수의 계산

각 단계에서 표면 압력계수는 물체에 고정된 좌표계에 대해 식 (7)을 사용하여 각 요소의 도심에서 계산된다. 식 (7)에서 $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ 를 제외한 모든 항은 반복적으로 계산이 되고, n번째 단계에서

$\frac{\partial \phi}{\partial t}$ 은 다음과 같이 차분화된 식으로 계산이 된다.

$$\frac{\partial \phi^n}{\partial t} = \frac{\partial \phi^{n-1}}{\partial t} + \left(\frac{\partial \phi^{n+1}}{\partial t} - \frac{\partial \phi^{n-1}}{\partial t} \right) \frac{\Delta t_{n-1}}{\Delta t_{n+1} + \Delta t_{n-1}} \quad (9)$$

이때

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi^{n-1}}{\partial t} &= \frac{\phi^n - \phi^{n-1}}{\Delta t_{n-1}} \\ \frac{\partial \phi^{n+1}}{\partial t} &= \frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t_{n+1}} \end{aligned}$$

여기서 수면에 의해 교차되는 요소들에 대해 $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ 를 계산할 때에는 식 (9)의 우변중 첫 번째 항만이 존재하게 된다. 즉 후항 차분항만이 존재하게 되고, 이때 Δt_{n-1} 은 다음과 같은 식에 의해 결정이 된다.

$$\Delta t_{n-1} = \frac{h^n - h^{n-1}}{V_z + (C_w - 1)(\vec{V}_p \cdot \vec{k})} \quad (10)$$

여기서 h^n 은 n번째 단계에서의 요소 도심의 깊이를 의미하고, V_z 는 수면에 고정된 좌표계, (x, y, z) 에서 물체의 z방향 속도를 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

본 연구의 결과를 검증하기 위하여 disk 형상이 여러 가지 입수각도를 가지고 입수하는 경우에 대하여 계산한 결과를 참고문헌 [2]에 나와 있는 실험 결과와 비교하여 보았다. 또한 ogive 형상이 수직으로 입수하는 경우에 대해서도 참고문헌 [2]의 실험 결과 및 계산 결과와 비교하여 보았다. 그리고, 또 다른 ogive 형상의 물체가 임의의 각도로 입수하는 경우에 대해 받음각을 변화시켜 봄으로써 받음각과 충격량, 표면압력등이 어떠한 상관 관계를 가지는 지 조사해 보았다.

4.1 Disk의 경우

그림 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 바뀌가면서 계산을 수행해 본 결과, 그림 4에 나타나 있듯이 참고문헌[2]의 실험결과와 유사한 경향을 보이는 것을 관찰할 수 있었다. 이때, 그림 4에 나타나 있는 무차원 시간은 식 (11)과 같이 정의되는 값이다.

$$\text{Nondimensional Time} = \frac{V_E \times t}{D} \quad (11)$$

4.2 Ogive의 경우

그림 5는 ogive 형상에 대한 치수와 표면에 생성된 요소를 나타낸 것이다. 입수조건으로 입수속도를 51.4 m/sec, 입수각도를 90° 로 하여 계산을 수행해 본 결과, 이 경우도 그림 6에 나타나 있는 것처럼 참고문헌[2]의 실험결과 및 다른 계산 결과와 유사한 값을 나타내는 것을 관찰할 수 있다.

그림 7은 그림 5보다 좀 더 가느다란 형상의 ogive에 대한 치수 및 표면 요소를 나타낸 것이고, 그림 8, 9, 10은 이와 같은 형상의 물체가 입수속도 70 m/sec, 입수각도 45° 로 입수하는 경우 받음각과 물체의 항력 계수값, 수직력 계수값, x 방향 모멘트 계수값의 상관관계를 표시해 놓은 것이다. 이때 그림 9와 그림 10에 나와 있는 C_n 과 C_{m_x} 는 각각 다음의 식 (12), (13)과 같이 정의된다.

$$C_n = \frac{F_n}{\frac{\pi D^2}{4} \frac{1}{2} \rho V_E^2} \quad (12)$$

이때 F_n 은 관성좌표계 $-y'$ 방향으로의 수직력을 의미한다.

$$C_{m_x} = \frac{S_{m_x}}{\frac{\pi D^3}{4} \frac{1}{2} \rho V_E^2} \quad (13)$$

이때 S_{m_x} 는 x 방향의 모멘트를 의미하는 것으로, 물체를 시계 방향으로 회전시키려 할 때 S_{m_x} 는 양의 값을 가진다. 여기서, 그림 8의 받음각과 항력계수값의 관계를 살펴보면 받음각이 양인 경우의 초기 항력계수값이 받음각이 0이거나 음수인 경우보다 크게 나타나는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 받음각이 양인 경우가 다른 경우에 비해 입수시 높은 압력이 작용하는 표면적이 상대적으로 넓기 때문에 발생하는 현상으로 생각할 수 있다. 그리고 그림 9와 10을 서로 비교해 보면 받음각과 수직력 계수값의 관계와 받음각과 모멘트 계수값의 관계가 유사함을 발견할 수 있는데, 이러한 사실은 그림 7과 같은 ogive 형상의 물체가 45° 각도로 입수하는 경우 물체에 작용하는 수직력이 모멘트 발생에 주도적인 역할을 한다는 사실을 의미하는 것으로 해석할 수 있다. 그림 11(a)~(e)는 그림 7에서 언급한 ogive 형상의 물체가 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 의 받음각으로 입수하는 경우, 동일한 깊이에서 받음각에 따른 표면 등압력 분포를 나타낸 것이다. 또한 그림 12는 그림 7의 ogive 형상이 수직으로 입수하는 경우, 입수 시간에 따른 표면 등압력분포의 변화를 나타낸 것이다.

5. 결론

고속으로 입수하는 물체에 관한 충격력과 모멘트, 표면 압력 등을 계산할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 이때 입수 물체 주위의 유동은 비압축성, 비점성, 비회전 유동으로 가정하여 소오스 패널 기법을 적용하였다. 입수가 진행되는 동안에는 매 단계마다 요소를 재정의하여 소오스 패널 기법이 적용될 수 있게 하였다. 본 연구에 사용된 프로그램을 이용하여 disk와 ogive 형상에 대한 충격량 해석을 수행해 본 결과 실험결과와 유사한 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 ogive 형상에 대해 받음각을 변화시켜 계산을 수행해 본 결과 물리적으로 타당한 결과를 얻을 수 있었다.

6. 참고문헌

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

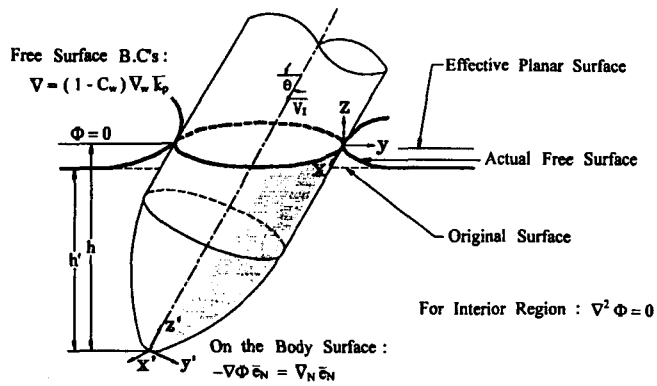


그림 1. 문제의 정형화

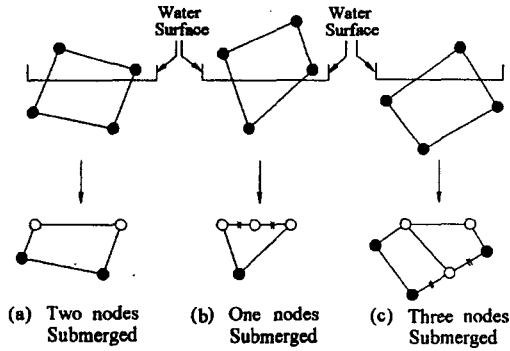


그림 2. 수면에 의해 분할된 요소의 재정의 및 수정
 (● : 원래의 절점, ○ : 재정의된 요소)

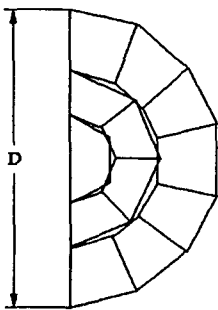


그림 3. Disk 격자의 모형

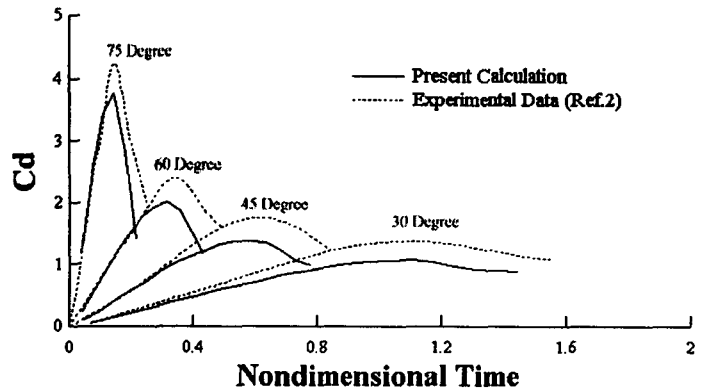


그림 4. Disk의 입수각도가 변화하는 경우 항력계수값

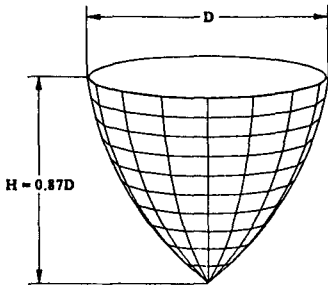


그림 5. Ogive 격자의 모형(I)

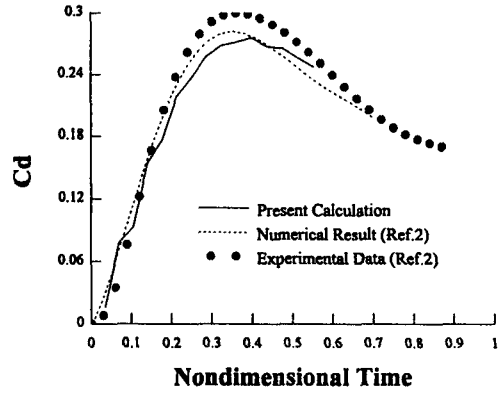


그림 6. 입수각도가 90°인 경우 항력계수의 값

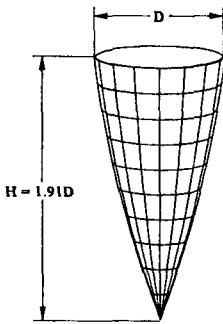


그림 7. Ogive 격자의 모형(II)

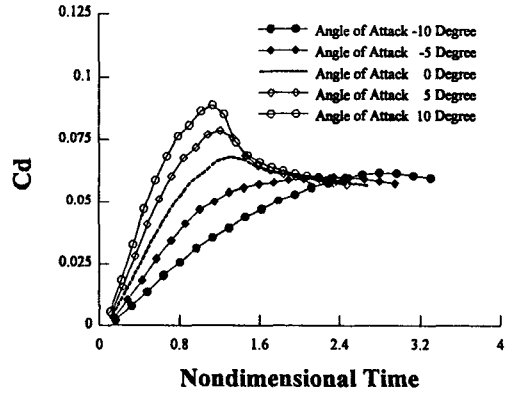


그림 8. 입수각도 45°로 입수하는 경우 받음각의 변화에 따른 항력계수값

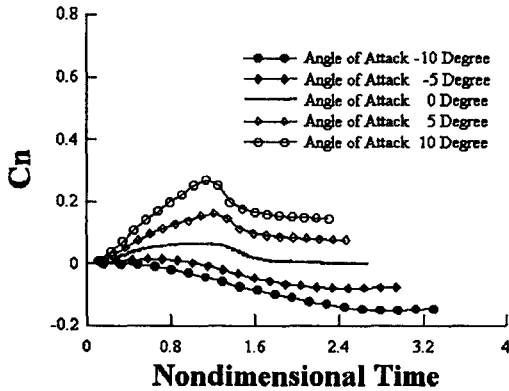


그림 9. 입수각도 45°로 입수하는 경우 받음각의 변화에 따른 수직력계수값

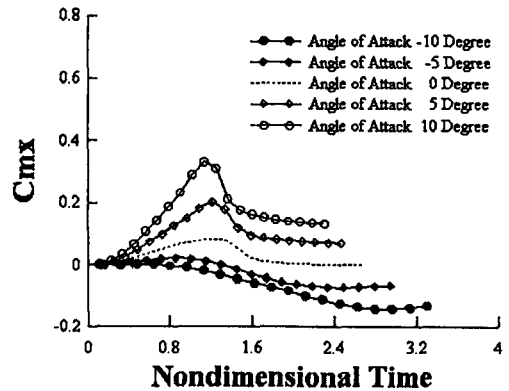
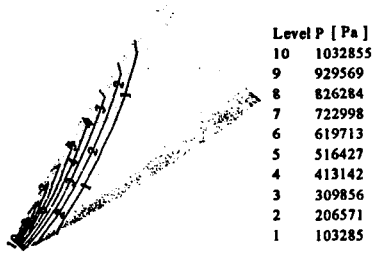
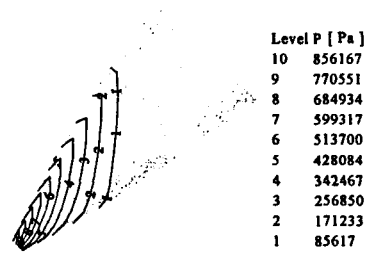


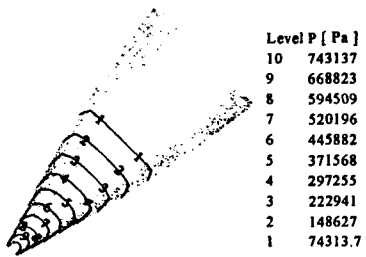
그림 10. 입수각도 45°로 입수하는 경우 받음각의 변화에 따른 x방향 모멘트 계수값



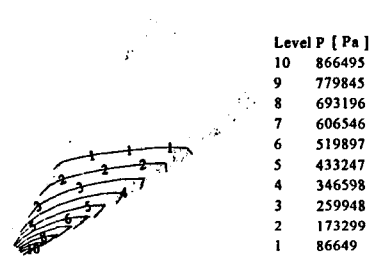
(a) 받음각이 -10° 인 경우



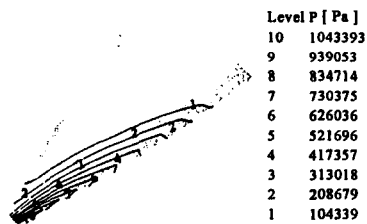
(b) 받음각이 -5° 인 경우



(c) 받음각이 0° 인 경우



(d) 받음각이 5° 인 경우



(e) 받음각이 10° 인 경우

그림 11. 입수각도 45° 에서 받음각의 변화에 따른 표면 등압력 분포

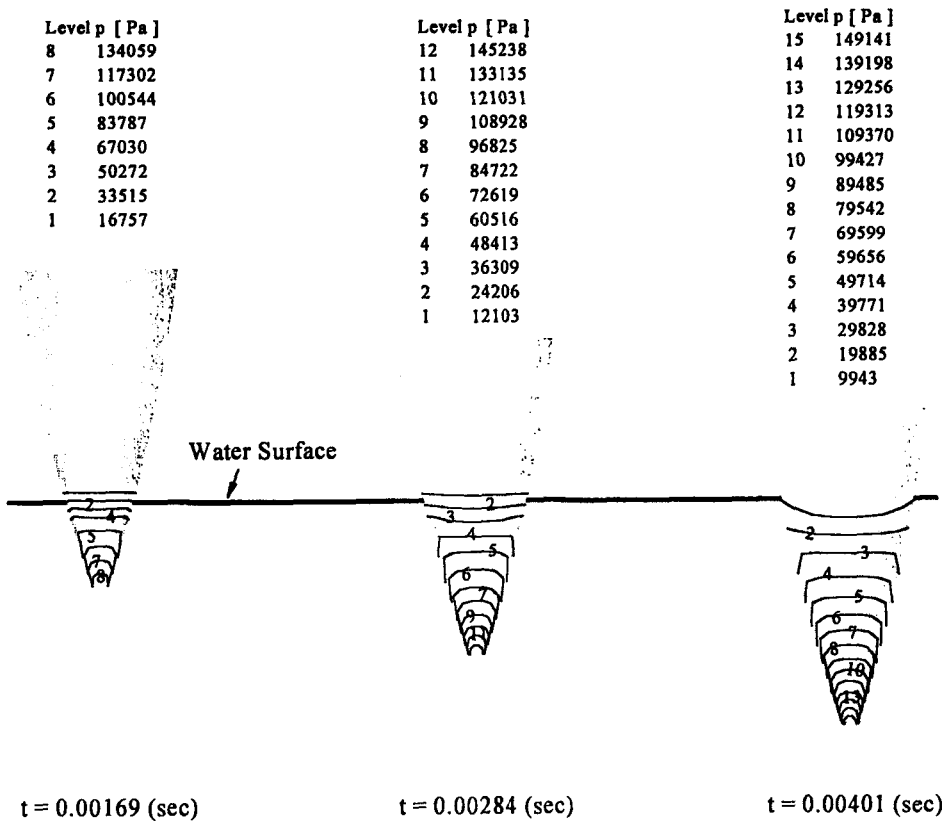


그림 12. 입수각도 90° 에서 입수 시간에 따른 표면 등압력 분포의 변화