

# 자유수면에 낙하하는 물체의 충격압력 변화에 관한 연구 A Study on the Impact Pressure of a Falling Body upon a Free Surface Water

이종붕\*  
Jong-Boong, Lee\*

## <Abstract>

The hydrodynamic impact problem was studied from 1929 to recent. Especially, Impact pressure is important for the design of the ships and offshore structure and spacecrafts, and under weapons. A ship traveling at high speed or in heavy sea has its bow and bottom damaged by high pressure caused by impact with and detachment from the water surface. Considerable impact may also occur when large waves hit the cross member or deck plate of an offshore structure within the splash zone. Many engineering cases require consideration of impact pressure, the movement of objects and change of the flow field. This study was obtained the pressure distribution of a falling body that is deadrise angle  $0^\circ$  and deadrise angle  $5^\circ$  upon a water surface by the experiment with the impact machine. The theoretical equation was obtained the air region and the interface and the water region which divide 3 parties between the body and the water surface for an investigation of the complete phenomena. Pressure distributions and histories compare favorably with available experimental data. The numerical results are similar to the experimental results for the impact force type with  $Fo(1+\cos \pi t/tc)$ .

**Key Words : Impact Pressure, Deadrise Angle**

## 1. 서 론

Von Karman<sup>1)</sup>은 1929년에 수상비행기의 착륙에 관한 충격 연구에서 유체역학적 충격 문제를 연구한 최초의 사람이다. 그는 물체에 의해 움직이기 시작하는 물에 부가된 질량의 개념을 도입했다.

Verhagen<sup>2)</sup>은 정지 물표면 위에 수직으로 무

한 평판이 떨어질 때 압축성 비점성 공기 경계 층은 평판과 물사이에 존재한다고 가정했다. 평판이 떨어질 때 평판과 자유표면 사이의 공기는 센서로부터 가장자리로 1차원적 흐름이 있고, 충격속도는 초당 몇 미터로, 물은 비압축성으로 고려했다. 자유표면은 변형되는 것으로 고려하고 충격은 변형된 자유표면이 평판의 끝에

\* 정회원, 경남대학교 기계자동화공학부 교수, 工博  
일본 九州대학 졸업 / 경남 마산시 월영동 449  
Tel : 055-249-2611 / Fax : 055-249-2617



접촉 할 때 발생한다고 했다.

Johnson<sup>3)</sup>은 낙하하는 평판블록과 편평한 무한 표면 사이의 공기의 흐름에 대해 2차원으로 설명했다. 그럼에도 불구하고 그는 충격 순간의 문제해결을 계속해 나갈 수 없었다. 그는 실험적 데이터와 일치하기 위해서는 물 자유표면의 변형을 고려하는 것이 필요하다는 결론을 내렸다. Lewison et al.<sup>4)</sup>은 압축성 물의 효과는 물의 비압축성 움직임 보다 중요치 않다는 것을 발견했다. Koehler et al.<sup>5)</sup>, Ng et al.<sup>6)</sup>는 2중 밀도 유체의 Navier-stokes 방정식을 풀기 위하여 유한차분법과 유한체적법 개념을 적용했다. Lim et al.<sup>7)</sup>는 CCD카메라를 이용하여 낙하동안의 압력을 측정함과 동시에 낙하물체 주위의 현상을 촬영했다.

이들 이전의 연구는 낙하물체의 모델의 밑면이 평면이고 밑면의 중심압력을 구하는데만 실험되고 연구되어졌다.

본 연구는 충격현상을 가상화 시키기 위하여 충격 실험장치를 개발하여 낙하물체의 형상각 (deadrise Angle은 0°, 5° 이고, 밑면 면적이 같고 종횡비가 1인 모델을 이용하여 밑면의 중심에서 일정 거리까지 압력 센서를 설치하고 낙하높이(50 cm, 30 cm)가 다른 위치에서 자유낙하시켜 수면 위에 떨어 뜨렸을 때 낙하물체 밑면 형상각의 변화에 따른 충격압력분포 특성과 공기압축의 영향을 받는 완충효과를 분석하고, 또한 충격파가 스프링상수와 감쇠상수가 물을 통과한 후 탱크하부의 알루미늄으로 만들어진 멤브레인에 영향을 끼쳐 발생하는 진동변위를 수치해석하여 이론적 선형 모델식을 구하고자 한다.

## 2. 관련이론

### 2.1 충격압력이론해석

점성 비압축성 유체의 자유표면 위에 물체가 자유낙하 할 때 충격압(impact pressure)은 Fig. 1과 같이 공기영역부분, 물영역부분, 공기-물 공유부분으로 나누어 해석되어져야 한다.

#### (1) 공기영역부분(air region)

압축성 공기영역에서의 흐름은 1차원으로 고려하고 비점성 등온이다. 연속방정식은

$$\frac{\partial(\rho_a u_a h_a)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_a h_a) = 0 \quad (1)$$

Verhagen<sup>4)</sup>에 의해 사용된 운동방정식은

$$\frac{\partial}{\partial t} u_a + u_a \frac{\partial}{\partial x} u_a = - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P_a}{\partial x} \quad (2)$$

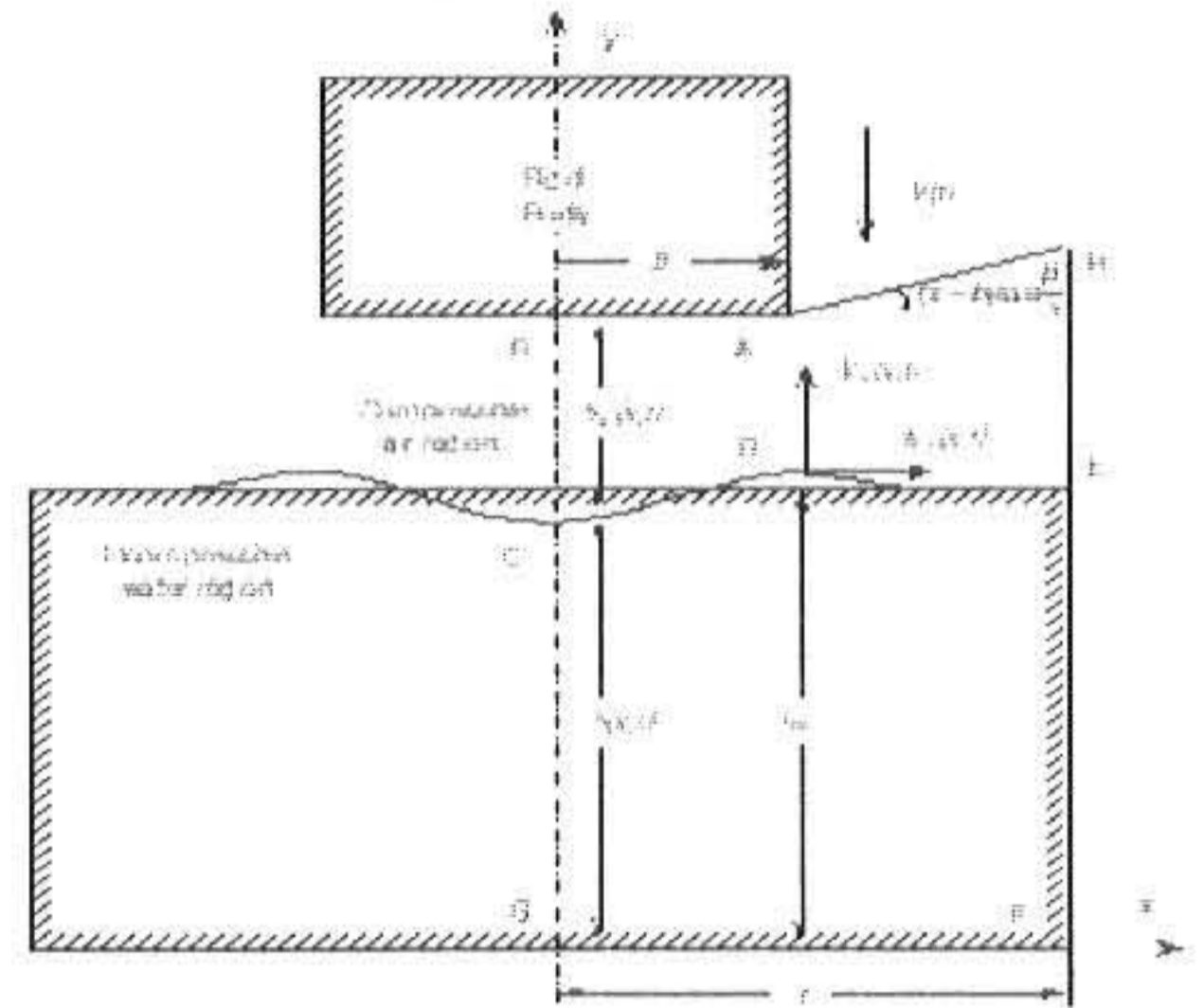


Fig. 1 General description of the impact system

등온이고 완전가스라고 보면 상태방정식은

$$\frac{P_a}{\rho_a} = K = \frac{P_{atm}}{\rho_{atm}} \quad (3)$$

상관관계에서

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^2$$

물과 분무 사이의 근사성을 가지고  $\gamma$ 는 등엔트로피값 1.4보다 1.0에 훨씬 가까워지도록 고려돼야 한다. 공기층의 두께는 낙하물체속도  $V(t)$ 와 시간이 지난 후 변형된 자유표면의 수직속도성분  $v_s$ 와 연관되어져 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} h_a(x, t) = - V(t) - v_s(x, t) \quad (4)$$

물체 하부의 공기 이탈과 AD경계를 통과할 때, 공기는 난류자유분류처럼 행동한다. Birkhoff에 따르면 대칭 난류자유분류는  $\beta = 25 \sim 30^\circ$  에서 발산한다. 이 Jet내의 압력은 일정하고 대기압력으로



유지되도록 고려되어야 한다. 분류 내부점  $x$ 에  
서 분류의 폭은  $h_a(b, t) + (x - b) \cdot \tan \beta / 2$  로 근  
사되어질 수 있다. 이 점에서 공기의 속도는

$$u_a(x, t) = \frac{h_a(b, t) \cdot u_a(b, t)}{h_a(b, t) + (x - b) \tan \beta / 2} \quad (6)$$

**(2) 물영역 부분(water region)**

비압축성 유체의 연속방정식은

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

압축성 유동에 대한 Navier-Stokes 방정식을  
 $x, y$ 방향으로 표시하면

$x$ 성분:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$y$ 성분:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_y \end{aligned} \quad (9)$$

위 식에서 압력의 항은 연속방정식과 운동량  
방정식에 의해 다음과 같이 얻어진다.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = -Q \quad (10)$$

여기서

$$Q = \rho \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (11)$$

초기 낙하물체는 자유수면으로부터 충분한 거  
리가 있다고 가정하고 공기층에서의 어떤 압력  
의 축적도 물 영역에 영향을 미치지 않을 것이  
다. 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P(x, y, 0) &= P_{HS} ; u(x, y, t) = 0 \\ ; v(x, y, 0) &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Fig.1에서 물영역 경계조건은 경계 CGFE가 된  
다. CG는 대칭 중심선이다. 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial P(x, y, t)}{\partial x} \right]_{x=0} &= 0 ; u(0, y, t) = 0 \\ ; \left. \frac{\partial v(x, y, t)}{\partial x} \right]_{x=0} &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

경계 CD는 물체아래서 (즉시 변하는) 자유수  
면이다. 수면에서 이 부분은  $0 \leq x \leq b$ 이고 경계  
조건은 다음과 같다

$$P(x, h, t) = P_a ; u(x, h, t) = u_s ; v(x, h, t) = v_s \quad (16)$$

물체의 오른쪽 자유수면을 살펴보면 DE이고  
영역은  $b < x \leq L$ 이며 경계조건은 다음과 같다.

$$P(x, h, t) = P_{atm} ; u(x, h, t) = u_s ; v(x, h, t) = v_s \quad (17)$$

경계 GF는 한정된 경계의 바닥이고 물체에  
가까운 부분에는 별로 영향을 미치지 않는다.  
경계조건은 다음과 같다.

$$\left. \frac{\partial P(x, y, t)}{\partial y} \right]_{y=0} = \rho_w g \quad (18)$$

$$u(x, 0, t) = 0 ; v(x, 0, t) = 0 \quad (19)$$

경계 EF는 오른쪽 경계이고 경계조건  $P(L, y, t)$   
는 (12)식으로부터, 그리고  $u(L, y, t)$ 는 (7)식 으  
로부터 구해진다. 경계조건은 다음과 같다.

$$\left. \frac{\partial v(x, y, t)}{\partial x} \right]_{x=L} = 0 \quad (20)$$

**(3) 공기-물 공유부분(air-water interface)**

공유면 위의 압력은 식(16)과 식(17)에서 구할  
수 있다. 공유면 위의 수직속도 성분  $v_s$ 는 연속  
방정식(7)로부터 계산되어진다.  $u_s$ 의 값은 공유  
면 움직임의 지배방정식에서는 실제적으로 나타  
나지 않는다. 그러나  $u_s$ 는 공유면 가까이의 속  
도에 영향을 미친다. 뉴우튼의 제2법칙으로부터  
공유면 한 영역 위의 접선 응력의 합은 이 영역  
의 질량과 공유면 가속도의 곱과 같다. 이 분석  
에 있어서 공유면은 두께가 0이고 공유면의 질량  
도 0이라고 가정한다. 뉴우튼의 제 2법칙은 공유  
면 한 영역 위의 접선 응력의 합을 단순하게 한



다. 물에서의 속도는 공기층에서의 속도보다 작기 때문에 층류로 가정한다. 뉴우튼의 점성법칙과 뉴우튼의 제2법칙은 공유면에서 적용된다.

$$\left[ \mu_{air} \frac{\partial u_a}{\partial y} - \mu_{H_2O} \frac{\partial u}{\partial y} \right] = 0$$

## 2.2 진동변위 이론해석

### (1) 선형화한 모델

선형화한 모델은 Fig. 2와 같다. Fig. 2의 충격압력으로 인한 모델 하부의 멤브레인 변위를 해석하려면 스프링-질량계에 점성감쇠를 더한 2자유도계, 선형화된 진동방정식으로 해석하는 것이 가장 적절하다.

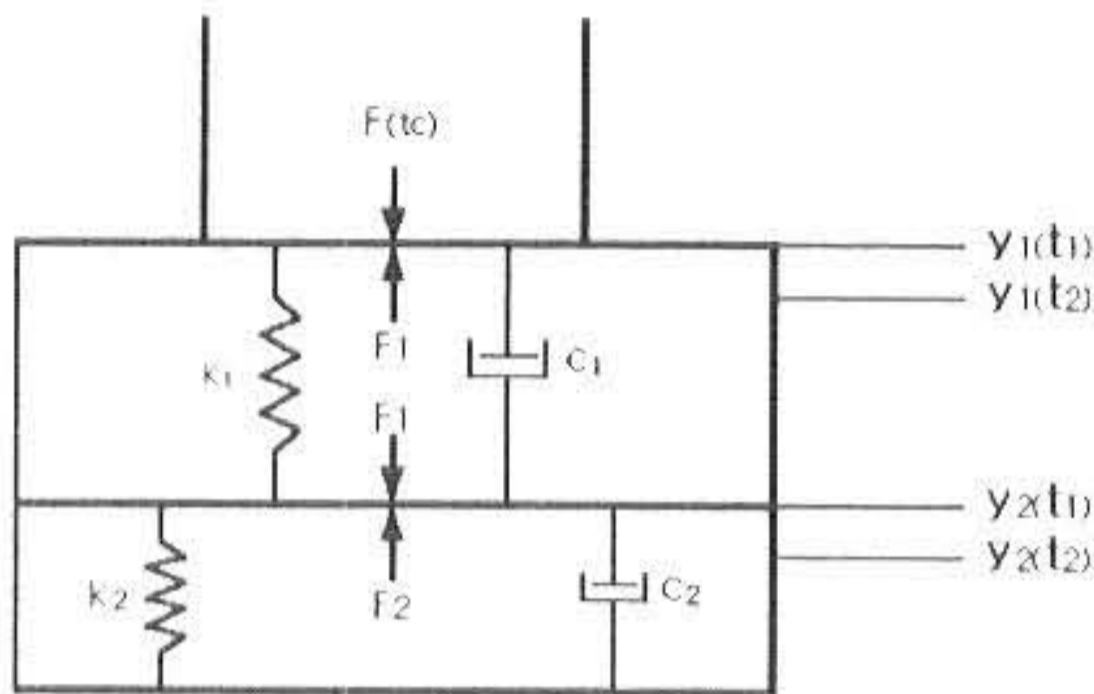


Fig. 2 Linear model of the impact system

Fig. 2 모델을 선형화된 식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_2 y''_2 + k_2 y_2 + c_2 y'_2 - k_1 \delta(t) - c_1 \delta'(t) = 0 \quad (22)$$

$$m_1(\alpha y''_2 + \delta''(t)) + k_1 \delta(t) + c_1 \delta'(t) = F_{tc} \quad (23)$$

(a) 물을 비압축성 유체라고 가정하였을 경우

$$(m_2 + \alpha m_1) y''_2 + k_2 y_2 + c_2 y'_2 = F_{tc} \quad (24)$$

(b) 물을 압축성 유체라고 가정하였을 경우

$$m_1 \delta''(t) + (1 + \alpha m_1/m_2)(k_1 \delta(t) + c_1 \delta'(t)) - \alpha m_1/m_2 (k_2 y_2 + c_2 y'_2) = F_{tc} \quad (25)$$

$$m_2 y''_2 + k_2 y_2 + c_2 y'_2 - k_1 \delta(t) - c_1 \delta'(t) = 0 \quad (26)$$

## 2.3 충격력 모델

수치 해석을 위한 충격력 방정식은 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_0^{+\infty} F(t) dt = m_1 V \quad (27)$$

여기서 충격력이 소멸되는 시간이 무한히 길다고 가정하면  $\lim_{t \rightarrow +\infty} F(t) = 0$  이고, 일정 시간 내에서 소멸된다고 가정하면  $F(t) = 0, t \geq tc$ 로 된다.  $tc$ 는 충격력이 소멸되는 초기시간이다.

충격력 방정식은 다음과 같은 세가지 형태의 대수방정식으로 표현할 수 있고, Fig. 3에 그래프로 나타내었다.

(a) 충격력 형태 1

$$Ft = F_0 (e^{-at} - e^{-bt})$$

(b) 충격력 형태 2

$$Ft = F_0 (1 - \cos 2\pi t/tc)$$

(c) 충격력 형태 3

$$Ft = F_0 (1 + \cos \pi t/tc)$$

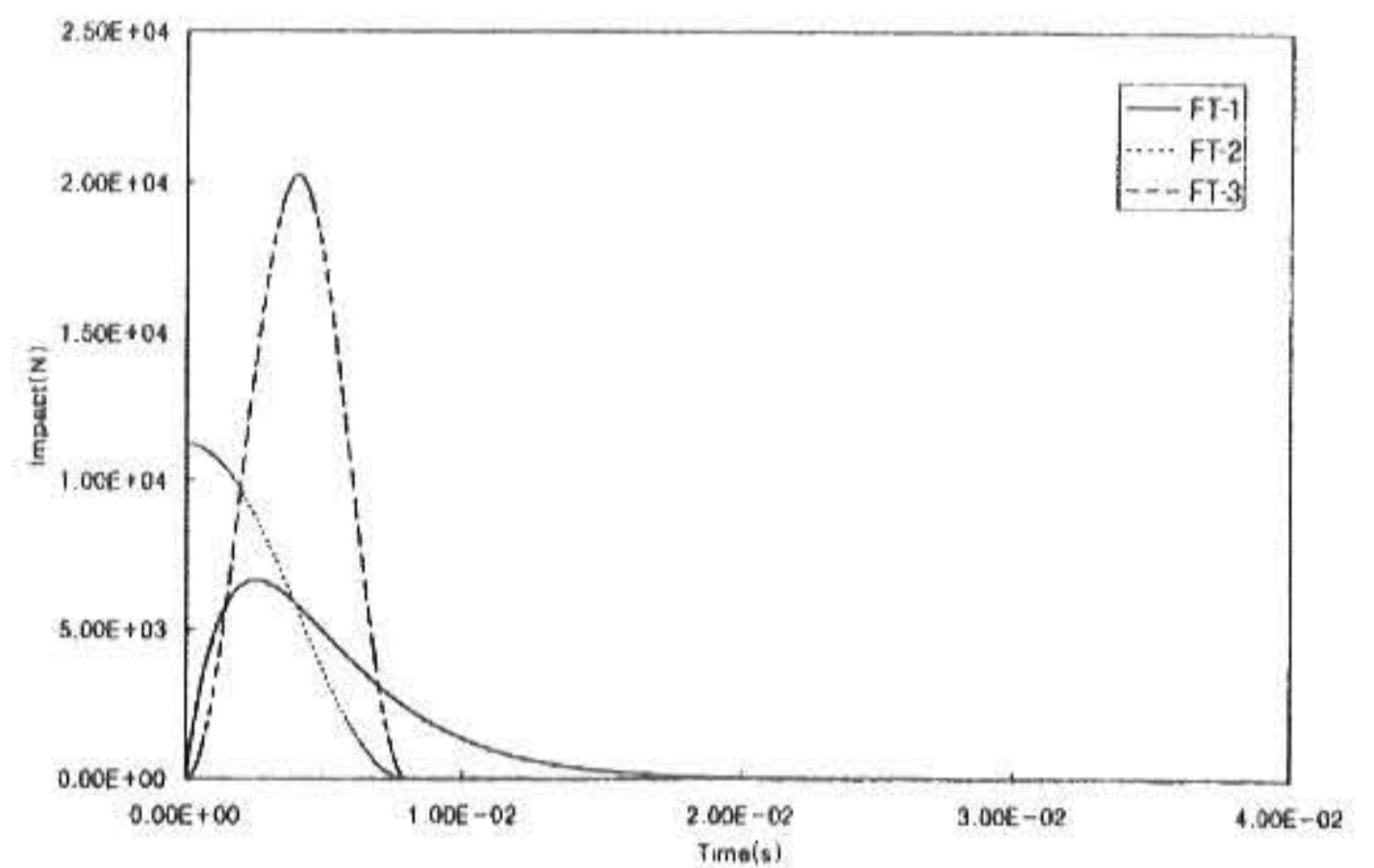


Fig. 3 Exterior forces of the impacts( $m_1 V = 81.4 \text{ kg m/s}$ )

## 3. 실험장치 및 방법

본 연구를 위한 실험장치는 충격압력과 진동변위를 측정하기 위하여 진동도르래와 연결된 전자석을 이용하여 중횡비 1, 형상각  $0^\circ$ , 형상각  $5^\circ$  인 낙하모형을 정해진 높이까지 이동시킨 후 전원을 차단시켜 낙하모형은 수면 위에 자유 낙하하게 한다. 충격압력 측정 위치는 각 낙하모형의 중심으로부터 10 mm 간격으로 측정하였고 진동변위 측정 위치는 멤브레인 하부



의 중심에서 측정하였다. 물탱크 내부 수면의 높이는 항상 일정하도록 하였으며 정적상태로 유지하기 위하여 낙하시험 시간간격을 충분히 유지하였다. 또한 실험모델의 바닥면은 수면과 평행하게 충돌하도록 낙하시 레벨게이지로 수평을 확인 후 수차례 반복 실험을 행하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 충격압력

액체 저장탱크의 외부에 충격을 가하기 위해 충격 시험기를 이용하여, 단면적이  $25600 \text{ mm}^2$ , 무게는  $26 \text{ kg}$ 으로 동일하지만 중횡비가 1, 형상각  $0^\circ, 5^\circ$  로 서로 다른 2가지 낙하모델을 사용하여 높이  $50 \text{ cm}, 30 \text{ cm}$ 에서 자유수면 위에 낙하시켰다. 충격에 의해 발생한 압력을 낙하모델 밑면의 중심에서 일정 거리까지 측정하여 특성을 해석하였다. 탱크의 압력분포는 실험모델을 자유낙하 시키면 수면에 가까울수록 공기는 압축성으로 바뀌어 자유수면의 변형을 초래하며 낙하모델의 가장자리에는 중심으로부터 압축공기의 흐름에 의해 거품발생 현상이 생겨 충격압력에 영향을 미치는 것으로 해석된다. Fig.4 - Fig.6은 중횡비 1, 형상각  $0^\circ$ , Fig.7 - Fig.9은 중횡비 1, 형상각  $5^\circ$  일 때, 낙하높이  $50 \text{ cm}(m_i V = 81.4 \text{ kg m/s}), 30 \text{ cm}(m_i V = 63 \text{ kg m/s})$ 일 때 중심부의 압력분포 특성을 나타낸다. 형상각  $0^\circ, 5^\circ$  모두 낙하높이가 낮아질수록 최대 충격압력은 감소하며, 최대 충격압력에 이르는 곡선의 기울기도 완만함을 보인다. 낙하높이에 따른 최대 충격압력은 형상각  $0^\circ$  일 때는 중심부에서, 낙하높이  $50 \text{ cm}$ 일 경우 기울기가 완만하게 변하지만 낙하높이가  $30 \text{ cm}$ 로 낮아지면 기울기가 커진다. 이것은 충격력에 영향을 미치는 자유낙하 속도가 낙하높이의 제곱근에 비례하고 낙하높이가 낮을수록 수면과 낙하모델 사이의 이탈된 공기분사량이 적어 공기압축에 의한 거품의 발생이 많아 쿠션효과에 영향을 주는 진동 회수가 증가하기 때문이다. 그러나 형상각  $5^\circ$  일 때는 수면과 낙하모델 사이의 공기분사량이 형상각  $0^\circ$  보다 많기 때문에 쿠션효과에 의한 진동의 회수도 작아서 최대 충격압력은 훨씬 크게 나타난다. 그리고 낙하높이에 따른 충격압력 감소폭이 형상각  $0^\circ$  보다 작게 나타난다.



Fig. 4 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle  $0^\circ$ , drop height :  $50 \text{ cm}$ , sensor position : center)

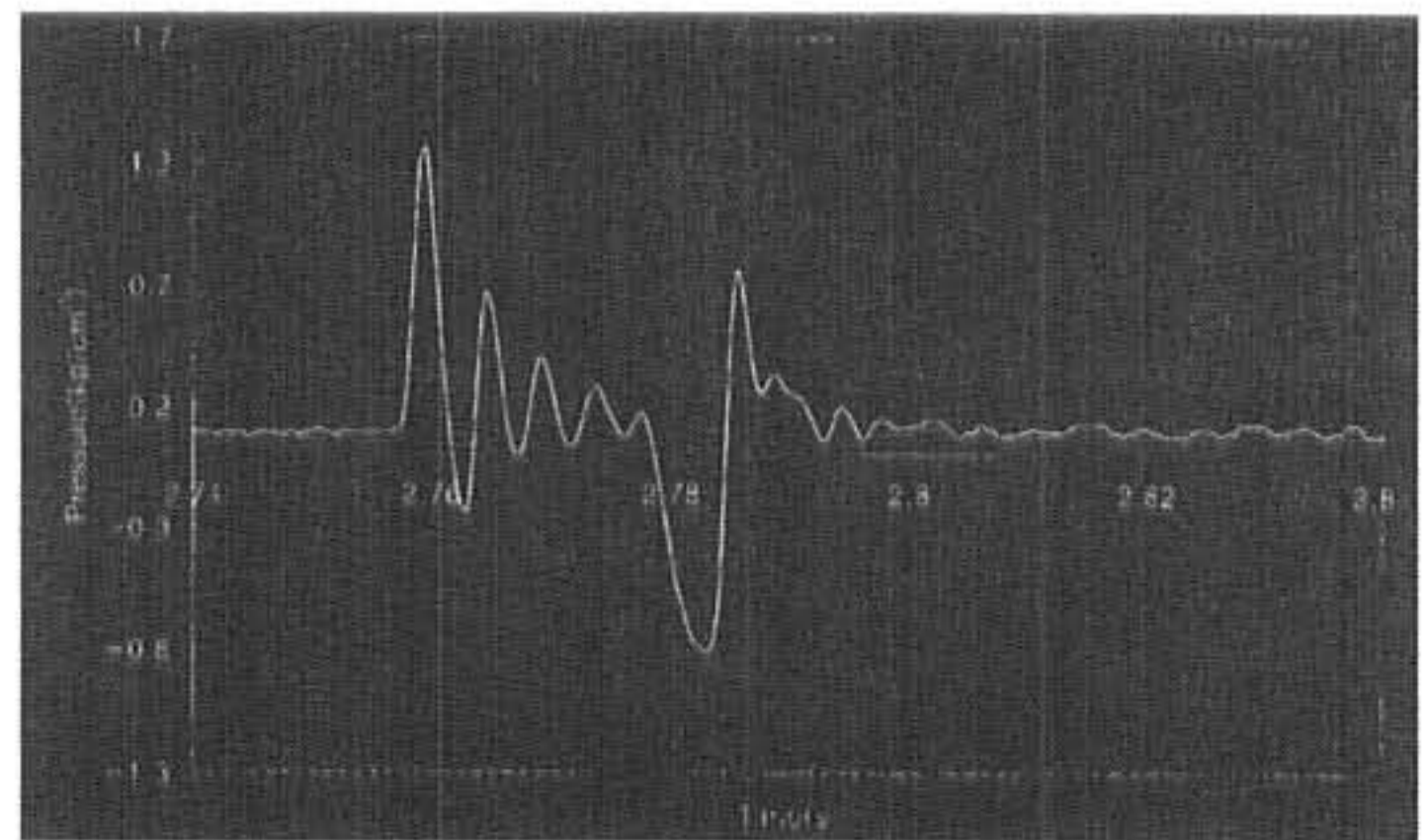


Fig. 6 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle  $0^\circ$ , drop height :  $30 \text{ cm}$ , sensor position : center)

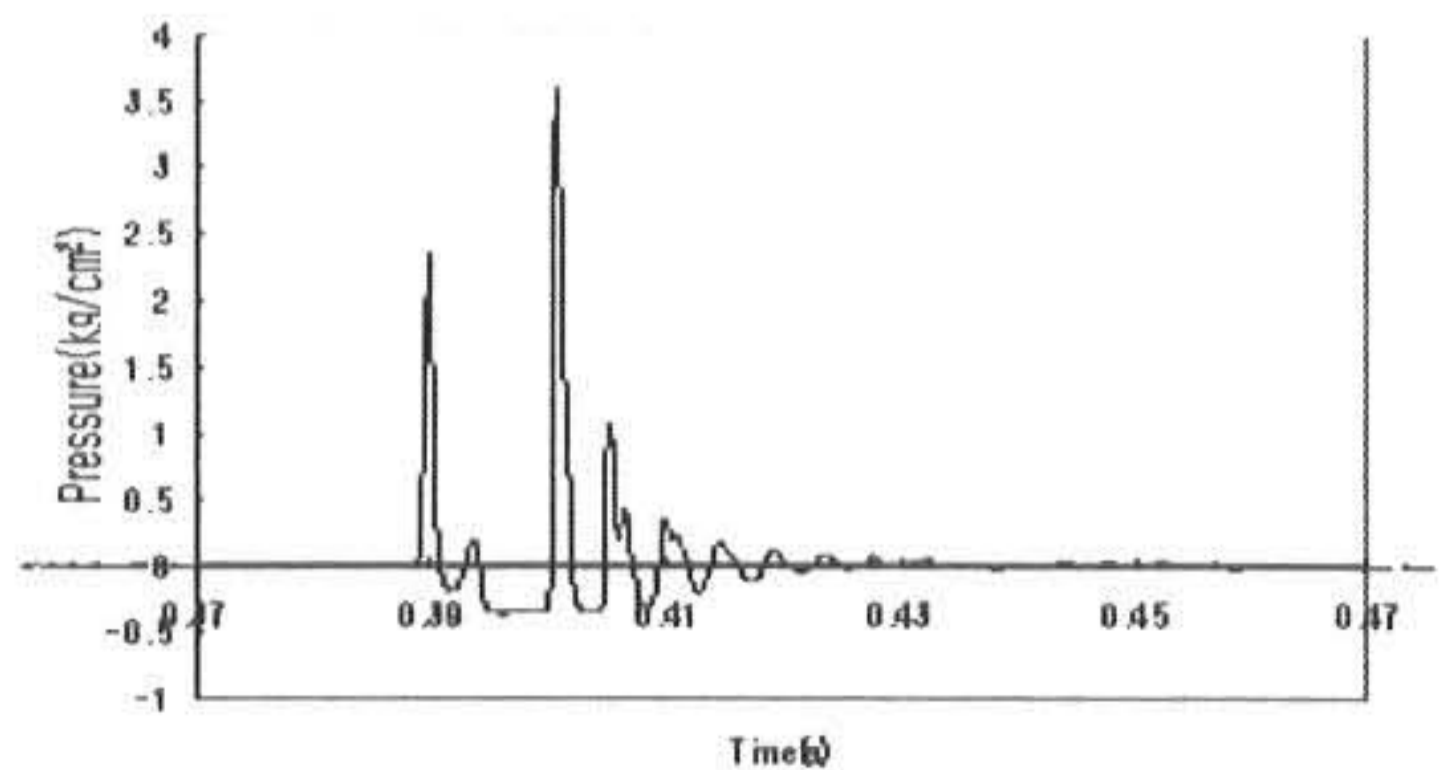


Fig. 7 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle  $5^\circ$ , drop height :  $50 \text{ cm}$ , sensor position : center)



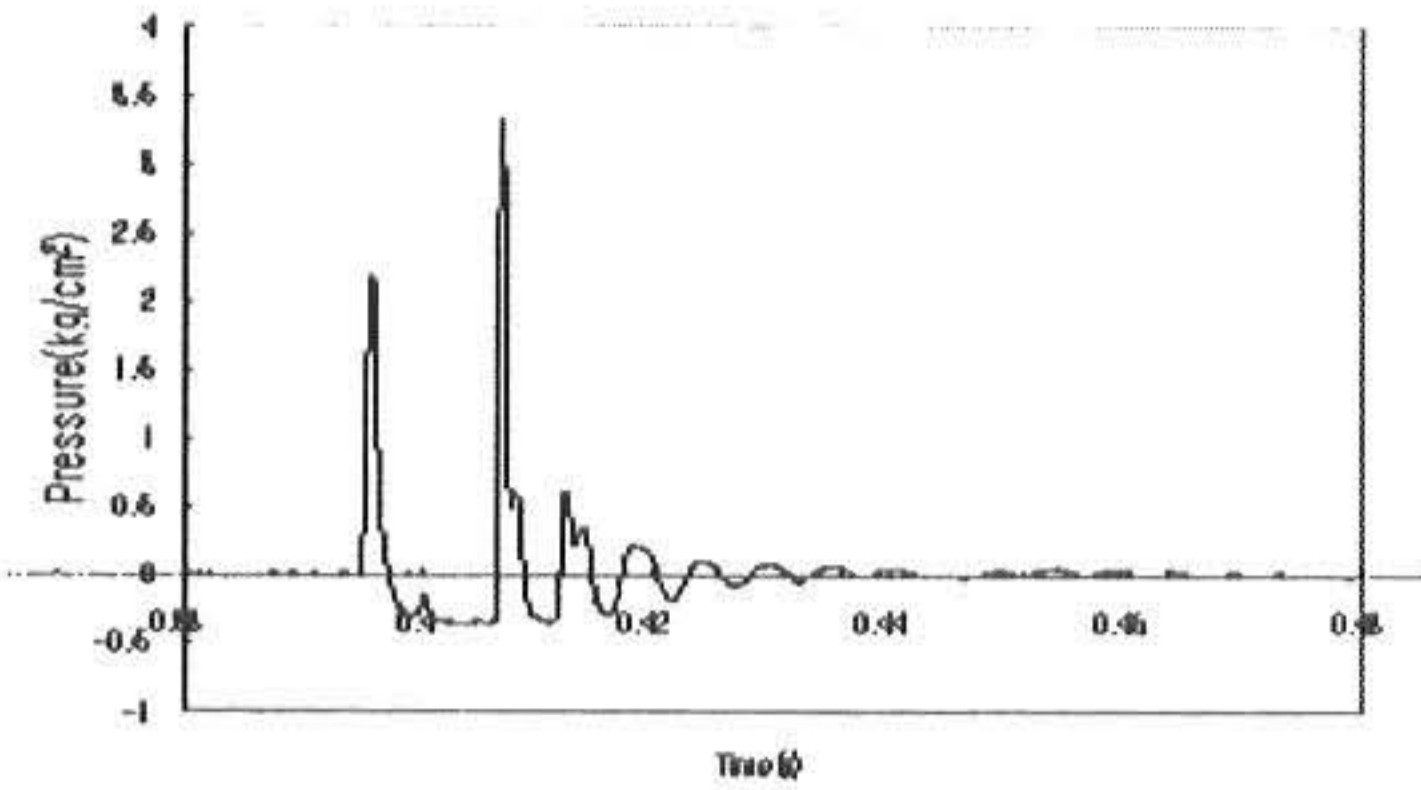


Fig. 8 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle 5° , drop height : 40cm, sensor position : center)

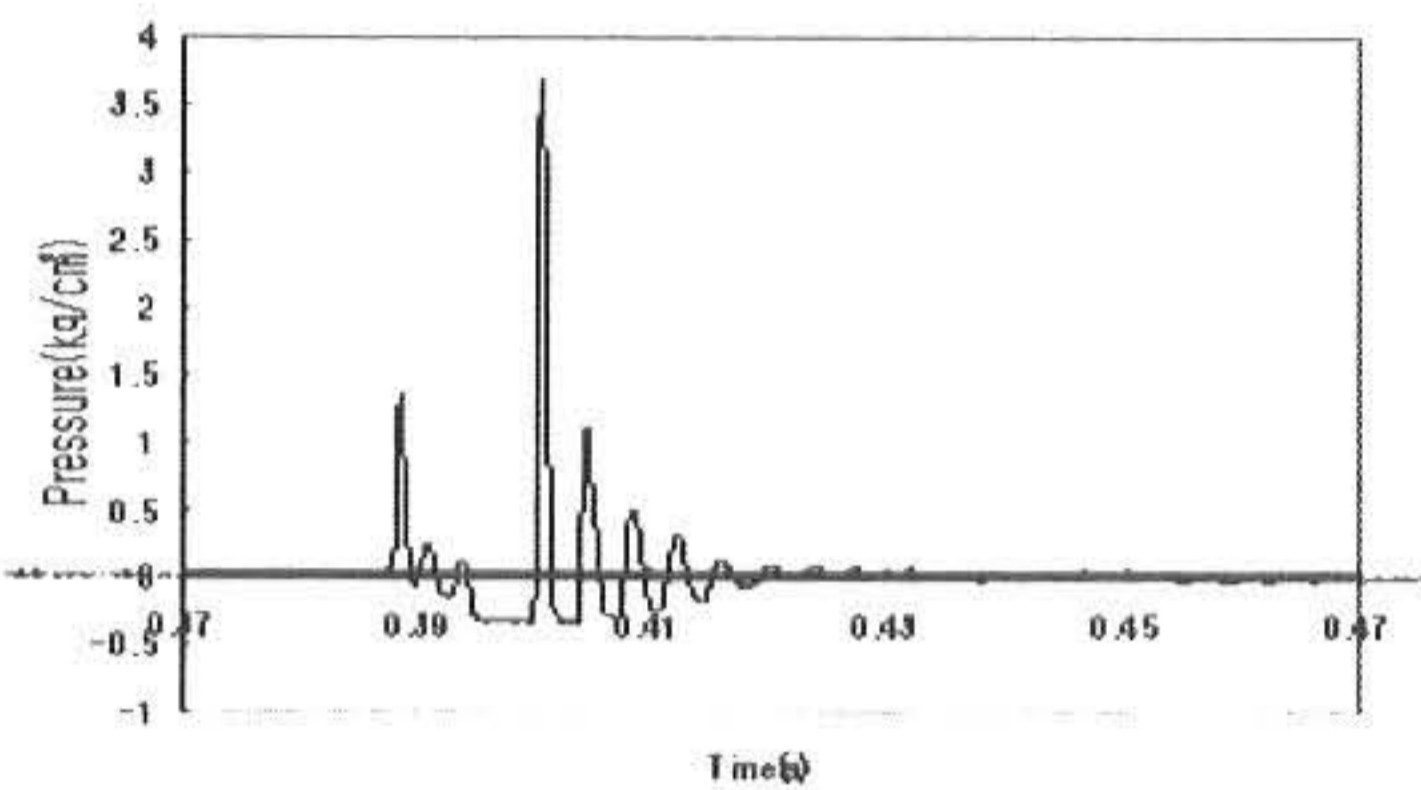


Fig. 9 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle 5° , drop height : 30 cm, sensor position : center)

Fig. 10 - Fig. 12은 종횡비 1, 형상각 0°, Fig. 13 - Fig. 15는 종횡비 1, 형상각 5° 일 때, 낙하높이 50 cm ( $m_1 V = 81.4 \text{ kg m/s}$ ), 40 cm ( $m_1 V = 72.8 \text{ kg m/s}$ ), 30 cm ( $m_1 V = 63 \text{ kg m/s}$ ) 일 때 중심과 중심으로부터 40 mm 위치의 압력분포 특성을 나타낸다. 형상각 0°, 5° 모두 낙하높이가 낮아질수록 최대 충격압력은 감소하며, 최대 충격압력에 이르는 곡선의 기울기도 완만함을 보인다. 낙하높이에 따른 최대충격압력은 형상각 0° 일 때는 중심부에서, 낙하높이 50 cm와 40 cm일 경우 기울기가 완만하게 변하지만 낙하높이가 30 cm로 낮아지면 기울기가 커진다. 이것은 충격력에 영향을 미치는 자유낙하 속도가 낙하높이의 제곱근에 비례하고 낙하높이가 낮을수록 수면과 낙하모델 사이의 이탈된 공기 분사량이 적어 공기압축에 의한 거품의 발생이 많아 쿠션효과에 영향을 주는 진동 횟수가 증가하기 때문이다. 낙하모델 중심으로부터 40 mm 위치의 낙하높이에 따른 최대 충

격압력의 차이는 중심부 보다는 상당히 작아진다. 그 이유는 낙하모델의 가장자리 부근으로 갈수록 공기압축에 의한 거품의 발생이 많아 쿠션효과에 영향을 주는 진동 횟수가 증가하기 때문이다. 그러나 형상각 5° 일 때는 수면과 낙하모델 사이의 공기분사량이 형상각 0° 보다 많기 때문에 쿠션효과에 의한 진동의 횟수도 작아서 최대충격압력은 훨씬 크게 나타난다. 낙하모델 중심으로부터 40 mm 위치의 낙하높이에 따른 최대충격압력의 차이는 훨씬 작아진다. 그 이유는 낙하모델의 가장자리부근으로 갈수록 형상각 0° 일 때는 공기압축에 의한 거품의 발생이 많아 쿠션효과에 영향을 주는 진동 횟수가 증가하나, 형상각 5° 일 때는 가장자리 부근에도 공기분사량이 많아 쿠션효과가 거의 나타나지 않기 때문이다. 또한 낙하높이에 따른 최대충격압력 감소폭도 형상각 0° 보다 작게 나타난다.

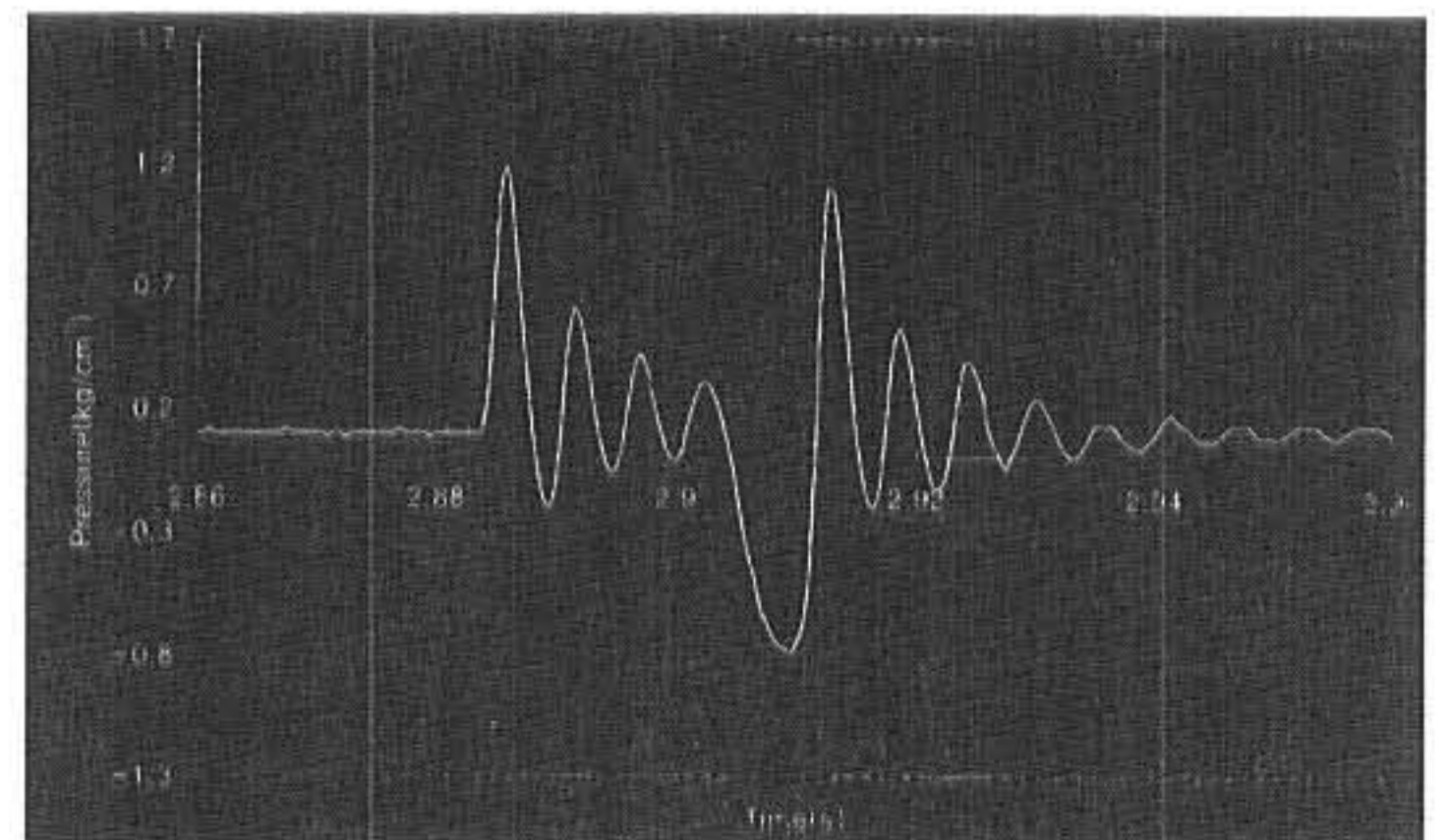


Fig. 10 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle 0° , drop height : 50cm, sensor position : 40 mm)

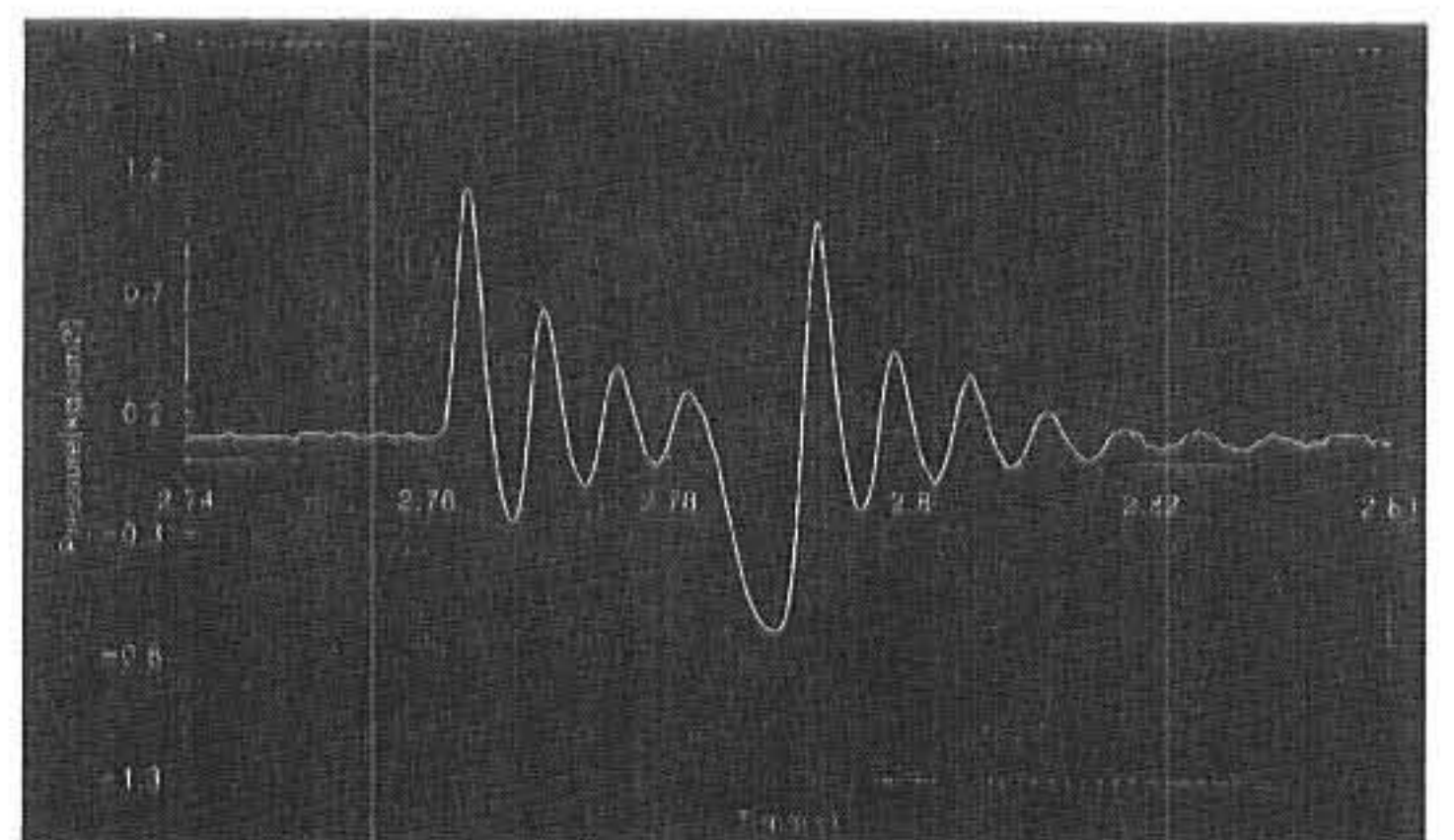


Fig. 11 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle 0° , drop height : 40cm, sensor position : 40mm)



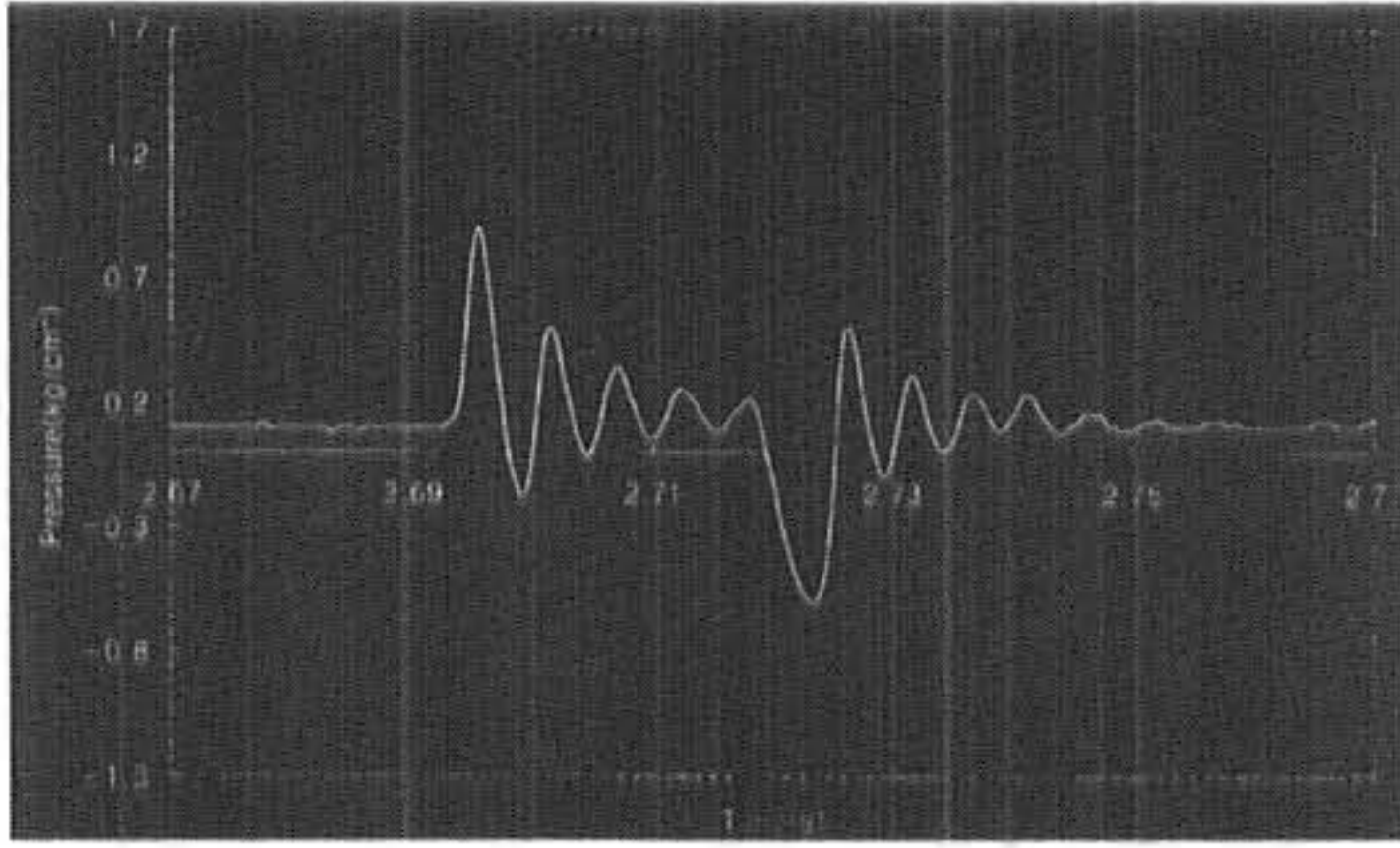


Fig. 12 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle  $0^\circ$  , drop height : 30cm, sensor position : 40 mm)

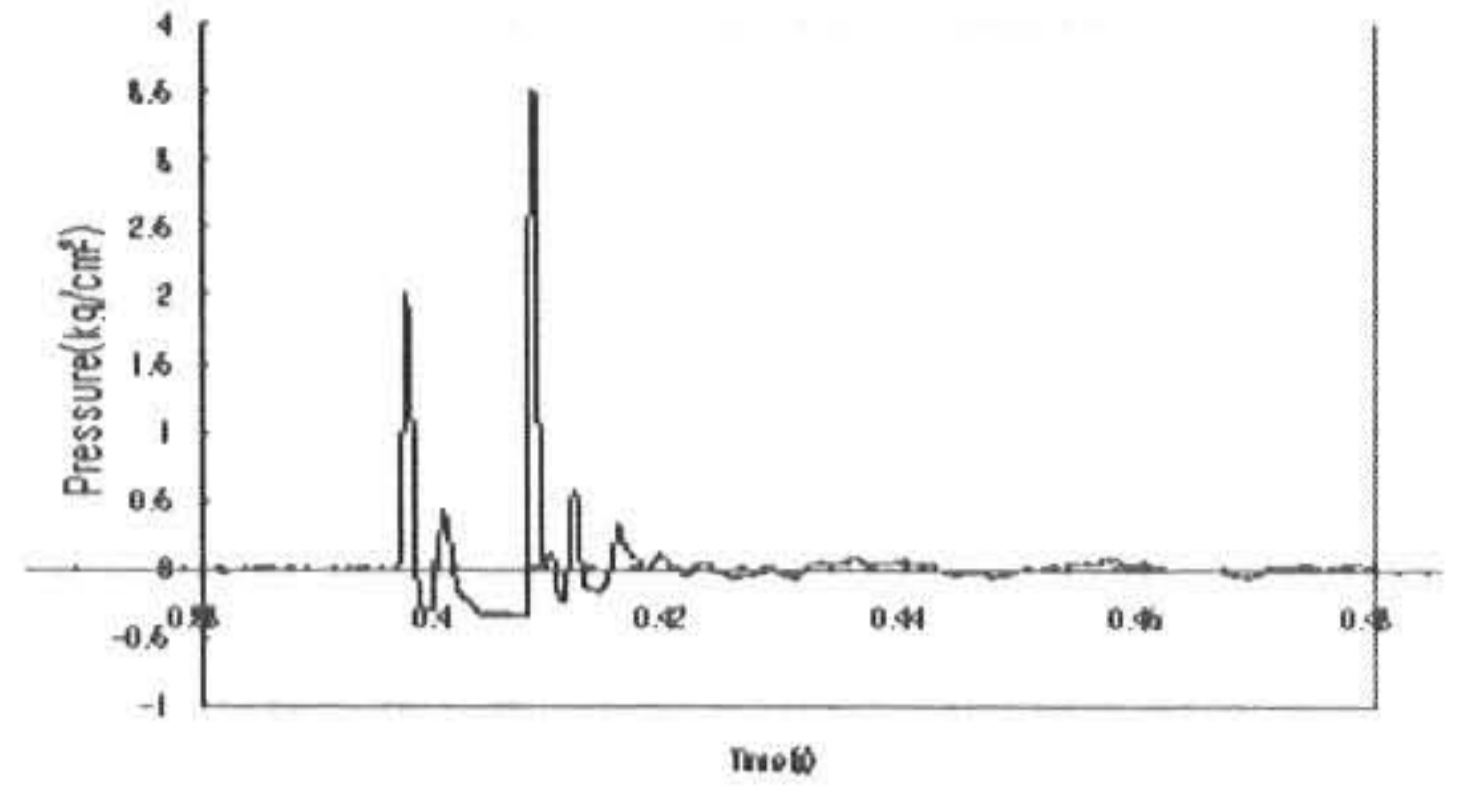


Fig. 15 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle  $5^\circ$  , drop height : 30cm, sensor position : 40 mm)

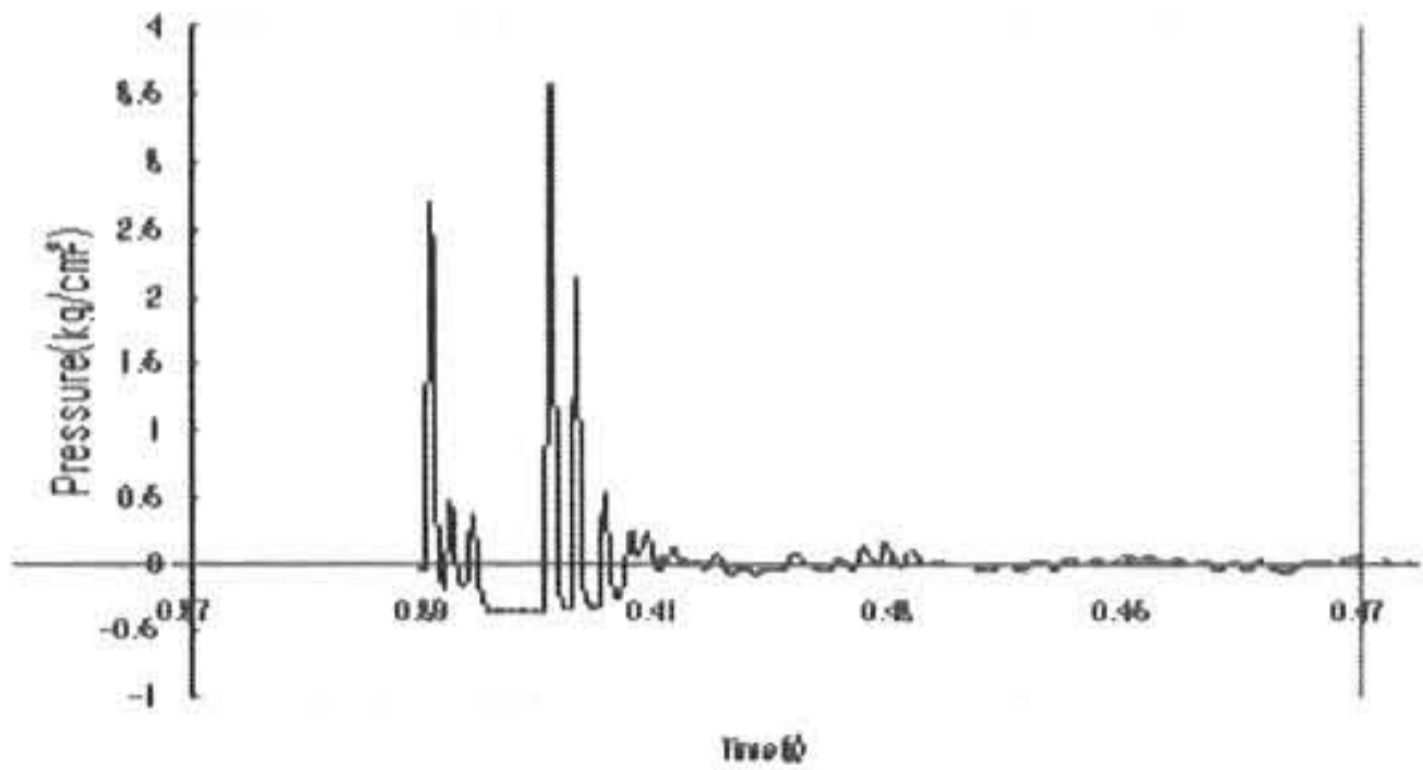


Fig. 13 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle  $5^\circ$  , drop height : 50cm, sensor position : 40 mm)

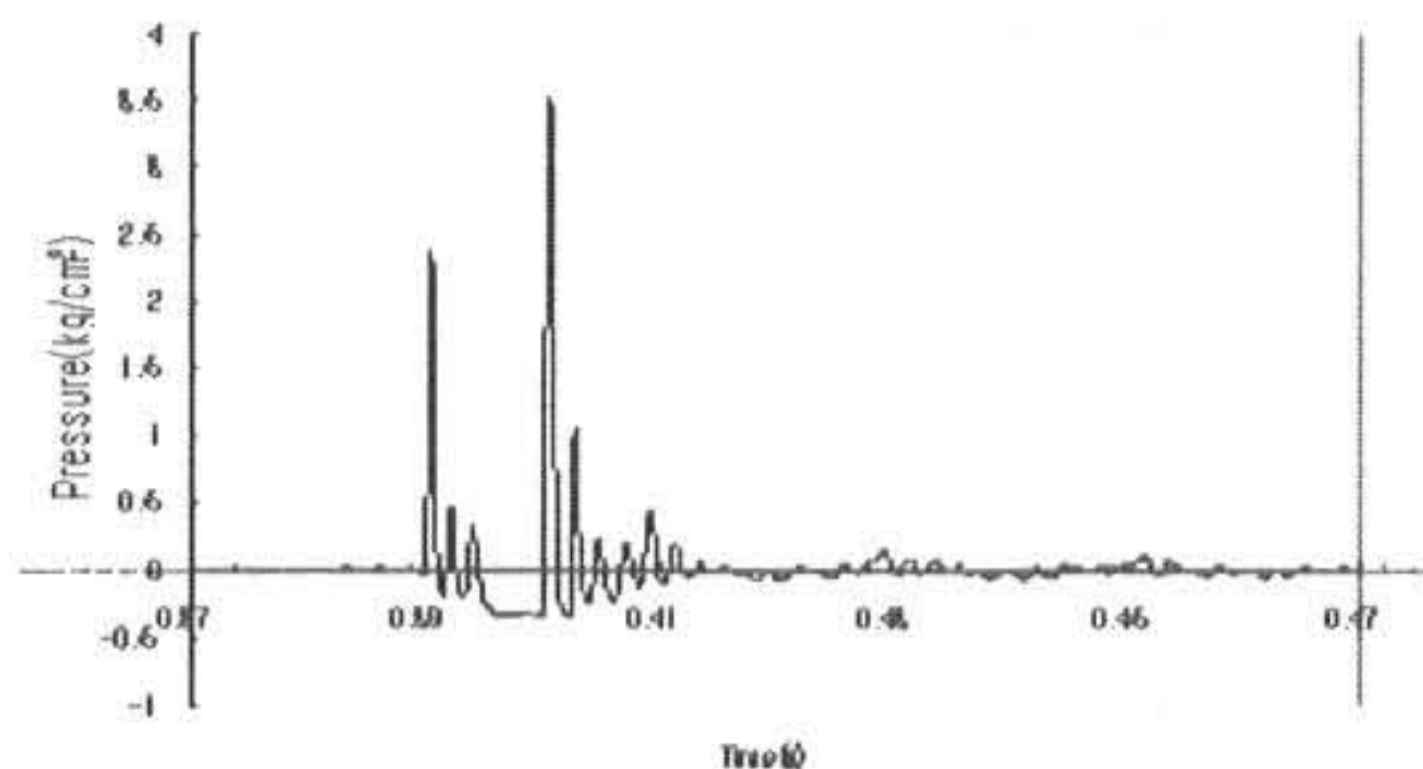


Fig. 14 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle  $5^\circ$  , drop height : 40cm, sensor position : 40 mm)

Fig. 16과 Fig. 17은 종횡비 1, 형상각  $0^\circ$  와 형상각  $5^\circ$  일 때 센서위치와 낙하높이에 따른 충격압력의 분포를 나타낸다. 중심부의 압력분포곡선 기울기는 형상각  $0^\circ$  와 형상각  $5^\circ$  모두 높이가 낮아질수록 커짐을 알 수 있다. 이것은 충격압력에 영향을 미치는 자유낙하 속도가 낙하높이의 제곱근에 비례하고 낙하높이가 낮아질수록 거품발생이 많아 작은 충격압력이 더욱 더 줄어들기 때문이다. 형상각  $0^\circ$  일 때 같은 낙하높이에서 가장자리부의 압력분포곡선의 기울기는 공기압축에 의한 거품의 영향을 많이 받아 기울기가 일정하게 조금씩 줄어든다. 그러나 형상각  $5^\circ$  일 때는 형상각  $0^\circ$  일 때보다 최대 충격압력이 훨씬 크게 나타나며, 또한 중심부보다 가장자리부에서 충격압력이 더 크게 나타난다.

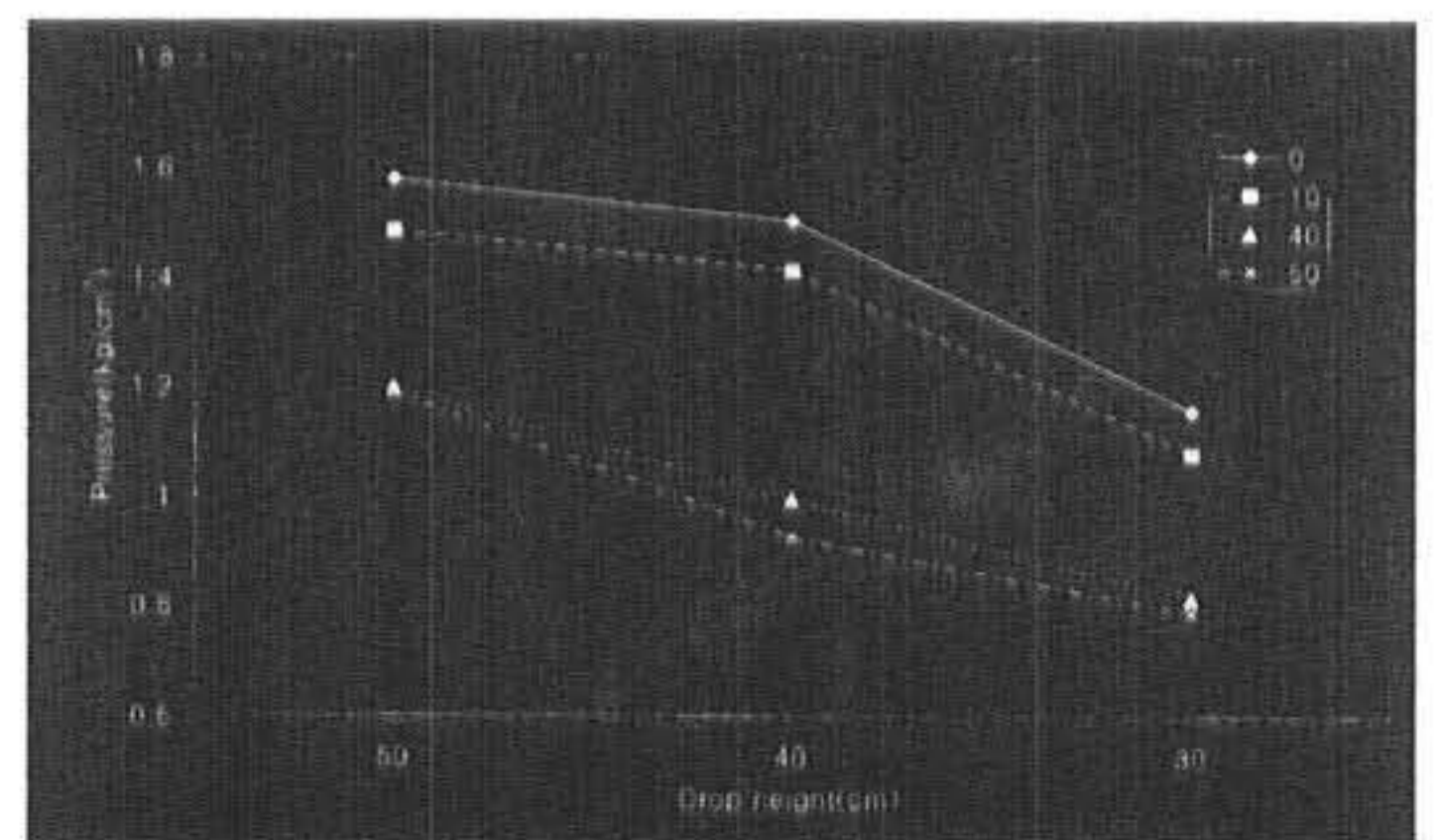


Fig. 16 Comparison of the pressure for drop height and sensor position(Deadrise Angle  $0^\circ$  )



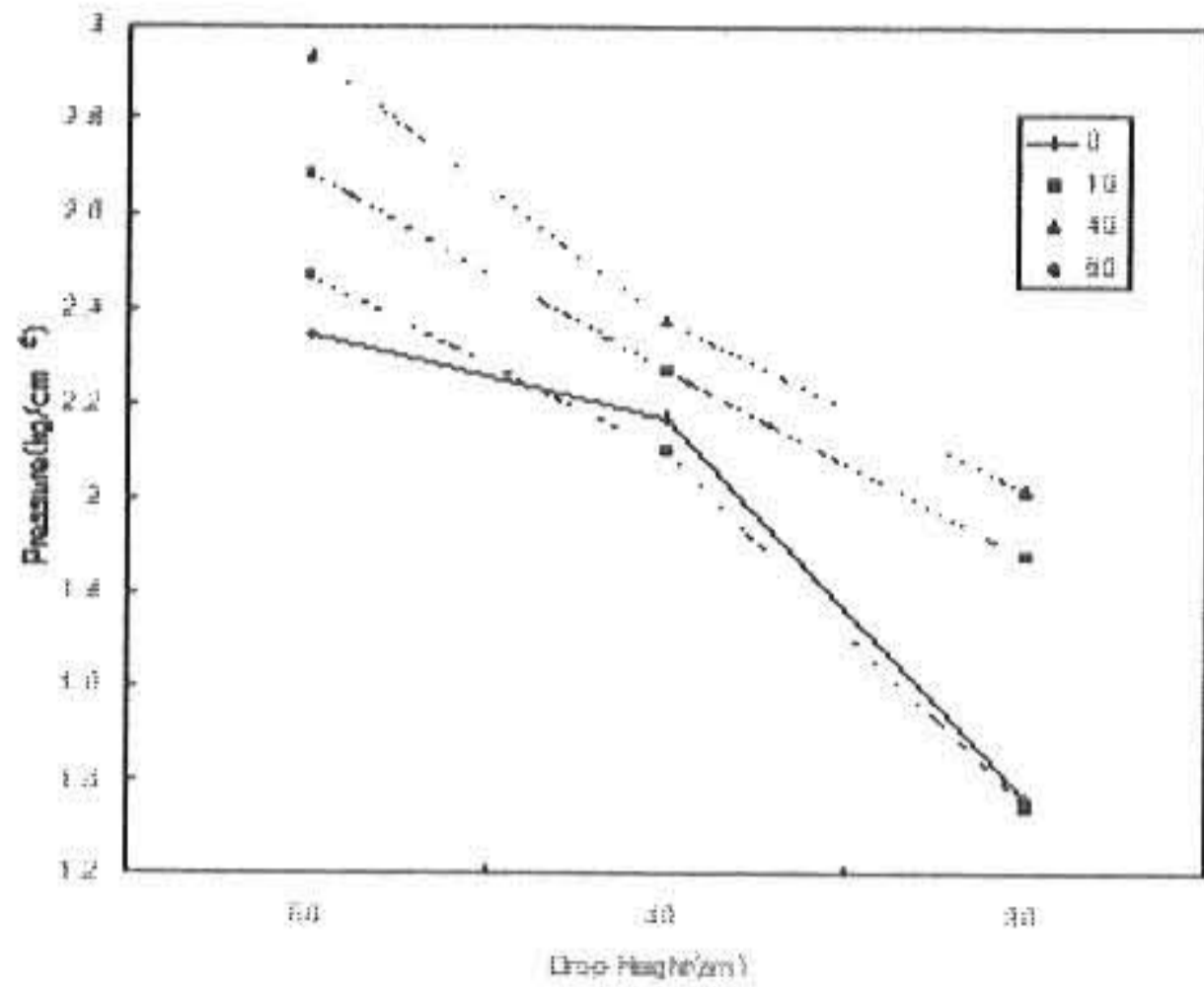


Fig. 17 Comparison of the pressure for drop height and sensor position(Deadrise Angle 5° )

이것은 공기분사량이 형상각 0° 보다 많고 또 공기압축에 의한 수면파의 발생에 의해 가장자리부가 중심부보다 수면에 먼저 충돌하기 때문이다.

#### 4.2 진동변위

##### (1) 압축성 해석

물탱크 속의 물을 압축성으로 간주하거나 또는 비압축성 유체로 볼 때 멤브레인 변위를 식(24)와 식(25), (26)의 수치해석 결과를 Fig. 18에서 비교하였다. 압축성 해석에서 물을 압축성 유체 또는 비압축성 유체로 간주할 때 변위의 차이가 거의 없다. 이것은 물의 스프링상수가  $2.7 \times 10^8$ 으로 아주 크기 때문이다. 또한 이것은 Lewison et al.<sup>6)</sup>의 실험에서 압축성 물의 효과는 물의 비압축성 움직임과 거의 차이가 없다는 해석과도 일치한다.

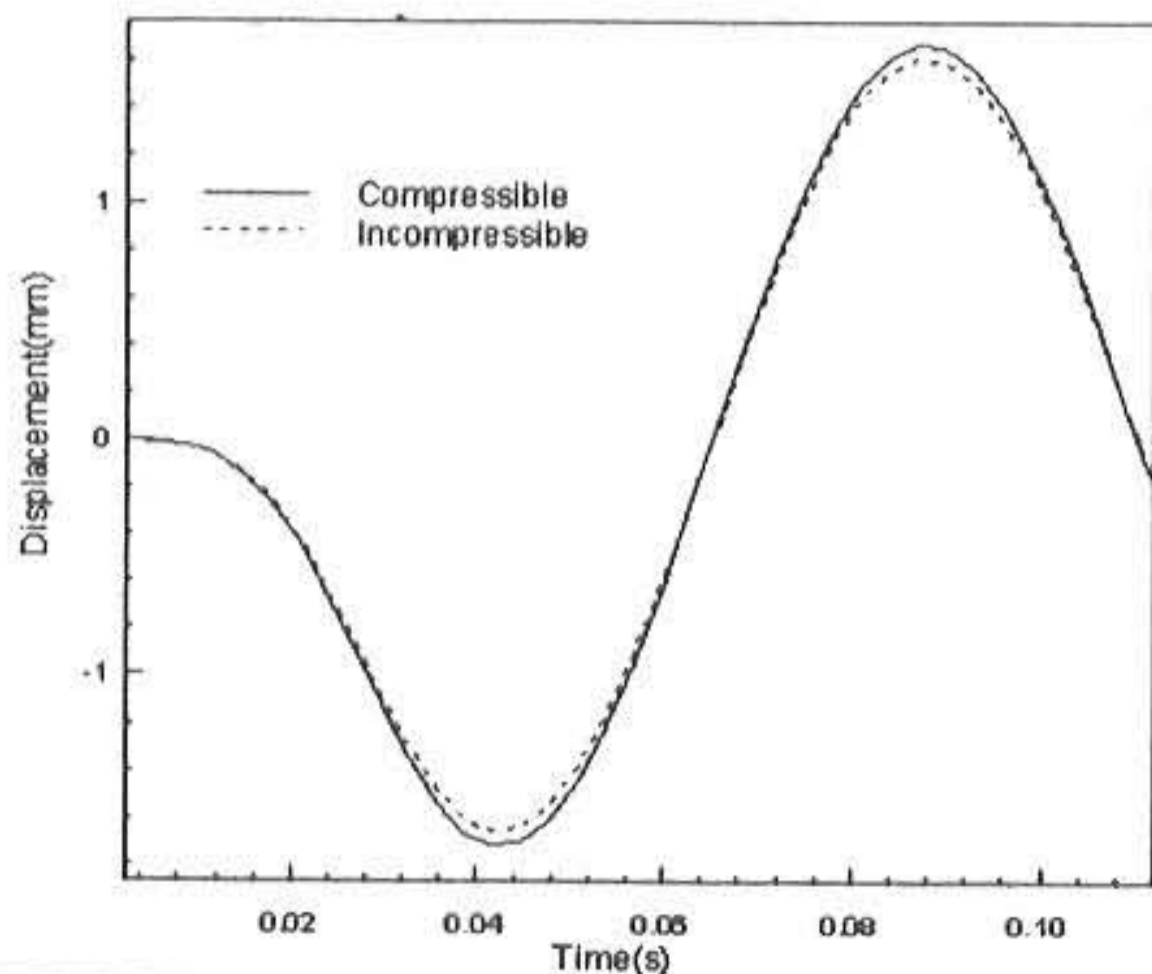


Fig. 18 Comparison of compressibility and incompressibility of the water

##### (2) 이론 모델 해석

###### (a) 충돌시간(impact time) 선정

충격력 형태  $Ft = F_0(1 - \cos 2\pi t/tc)$ 와 충격량  $m_1V = 81.4 \text{ kg m/s}$ 를 충돌시간 8 ms와 12 ms일 때 멤브레인 변위에 대한 수치해석의 결과와 실험치를 Fig. 19에 나타내었다.

충격력 형태  $Ft = F_0(1 + \cos \pi t/tc)$ 와 충격량  $m_1V = 81.4 \text{ kg m/s}$ , 8 ms는 최대변위량의 수치해석 결과가 실험치에 비해 조금 적으나 주기는 실험치와 거의 일치함을 나타낸다. 충격력 형태  $Ft = F_0(1 + \cos \pi t/tc)$ 와 충격량  $m_1V = 72.8 \text{ kg m/s}$ 를 충돌시간 8 ms일 때 멤브레인 변위에 대한 수치해석결과와 실험치를 Fig. 20에 나타내었다.

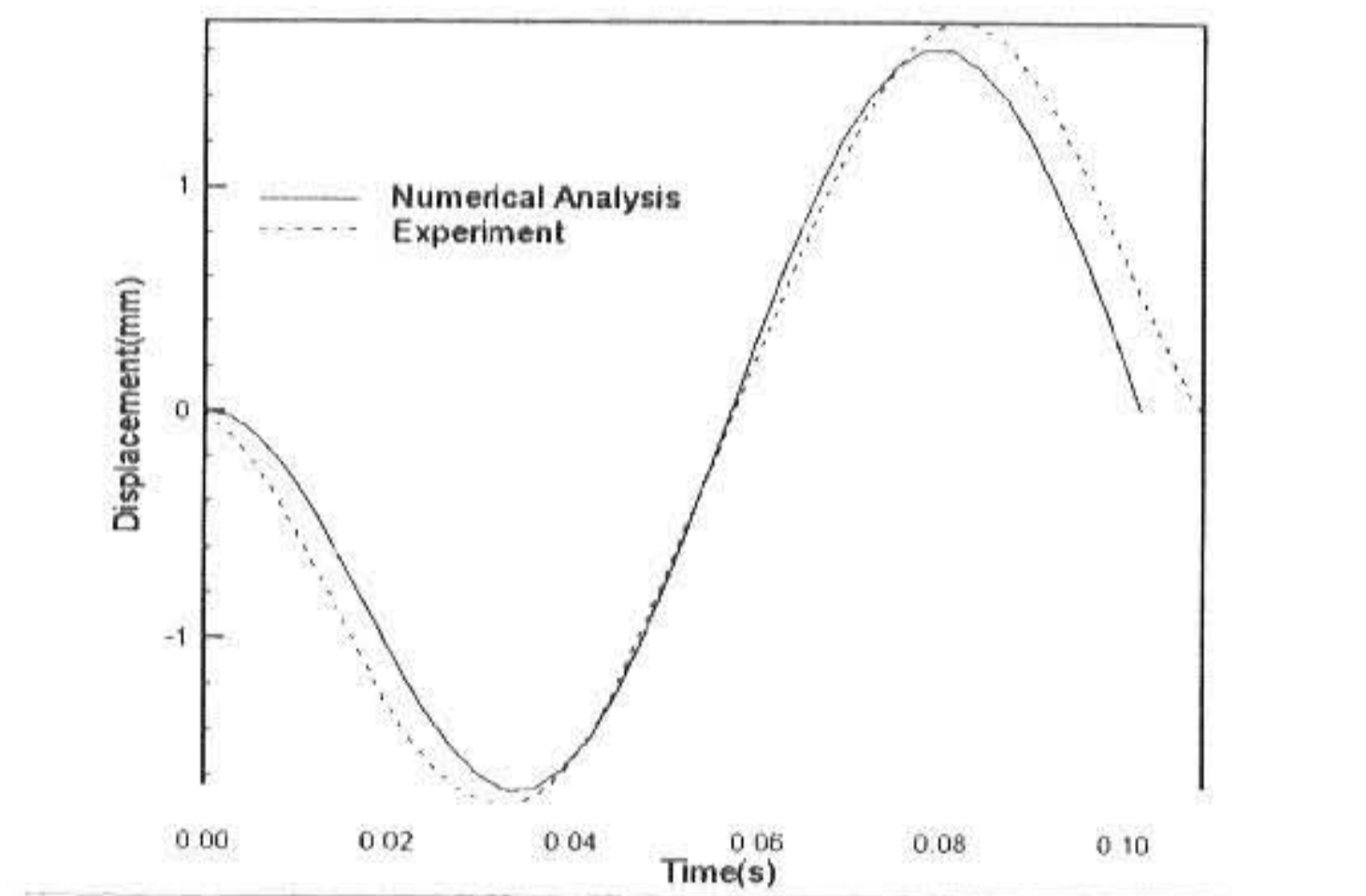


Fig. 19 Comparison of the membrane for numerical analysis and experement (impact time : 8 ms, drop height : 50cm, impact type : FT-3)

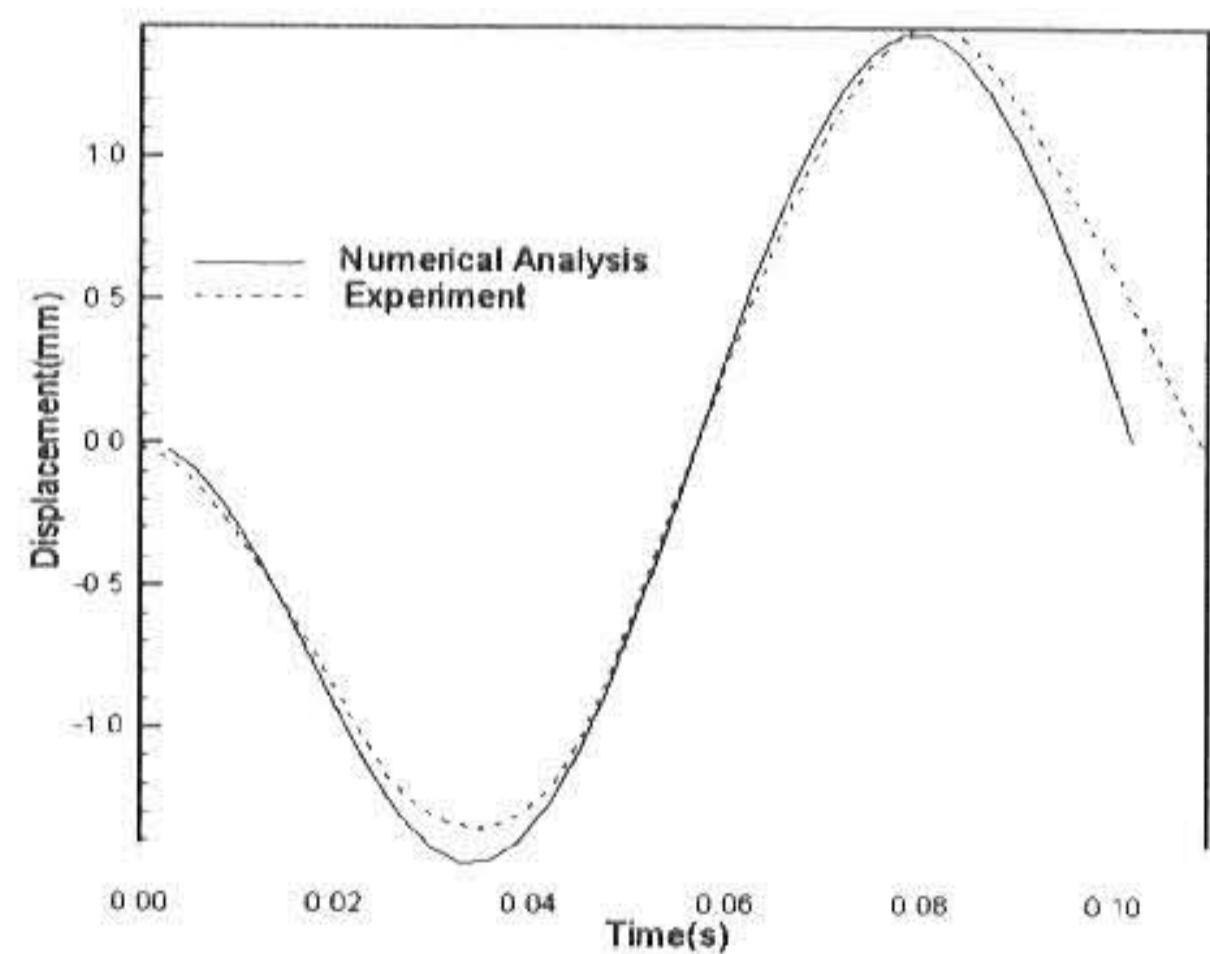


Fig. 20 Comparison of the membrane for numerical analysis and experement(impact time : 8 ms, drop height : 40cm, impact type : FT-3)



최대 변위량의 실험치가 수치해석 결과에 비해 조금 적으나 주기는 실험치와 거의 일치함을 보인다.

(b) 충격력형태 선정

Fig. 19과 Fig. 20에서 멤브레인변위의 수치해석결과와 실험치를 비교한 결과 멤브레인 변위는 주기가 8 ms일 때  $Ft = F_0(1 + \cos\pi t/tc)$ 가 실험치에 거의 일치함을 나타낸다.

5. 결론

본 실험은 충격현상을 가상화시키기 위하여 충격실험장치를 개발하여 낙하물체의 종횡비 1, 형상각 0° 와 형상각 5° 인 낙하모형을 이용하여 밑면의 중심에서 일정거리까지 압력 센서를 설치하고 낙하높이(50 cm, 40 cm, 30 cm)가 다른 위치에서 낙하시켜, 압력분포 특성을 해석하고, 멤브레인 진동변위를 수치해석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 모델 밑면 충격압력은 형상각 5° 일 때가 형상각 0° 일때보다 중심에서 외부로 빠져나가는 공기분사량이 많아 완충효과에 영향을 미치는 거품(bubble)의 발생이 적어 진동의 횡수가 줄어들어 충격압력이 크게 나타남을 보여준다.

(2) 모델 밑면 가장자리부의 충격압력은 형상각 0° 일 때는 쿠션효과에 의해 충격압력이 중심부보다 적게 나타나지만 형상각 5° 일 때는 충격압력이 크게 나타난다.

(3) 형상각에 관계없이 낙하높이에 따른 충격압력분포 곡선의 기울기는 비례함을 알 수 있다.

(4) 멤브레인 변위는 종횡비에 관계없이 낙하물체의 낙하높이가 낮아 낙하속도가 감소할 수록 변위의 낙하높이에 따른 감소량이 증가한다. 수치해석에서 멤브레인 진동변위는 충돌시간 8ms, 충격력 형태  $Ft = F_0(1 + \cos\pi t/tc)$ 가 실험값과 거의 일치한다.

기호설명

- A : Body bottom area
- b : Symmetrical body half width
- c : Wave velocity (1460 m/s)
- $c_1$  : Damping water constant
- $c_2$  : Damping membrane constant

- D : Membrane diameter
- E : Young coefficient
- $F_1$  : Water reaction force
- $F_2$  : Membrane reaction force
- $F_{(tc)}$  : Impact force
- $F_y$  : Water body force
- g : Acceleration due to gravity
- h : Water region height
- $h_a$  : Air layer thickness
- $h_m$  : Water region reference height
- $h_t$  : Membrane thickness
- $k_1$  : Water spring constant
- $k_2$  : Aluminium spring constant
- l : Symmetrical water region half width
- $m_1$  : Falling body mass
- $m_2$  : Water mass
- P : Water pressure
- $P_a$  : Air pressure (absolute)
- $P_{atm}$  : Atmospheric pressure (reference pressure)
- $P_{HS}$  : Hydrostatic water pressure
- Q : Water pressure source term
- R : Membrane radial
- T : Impact wave period
- t : Time
- u,v : Water velocities in x and y-directions, respectively
- $u_a$  : Air velocity in the x-direction
- $u_s, v_s$  : Free-surface water velocities in the x and y-directions respectively
- $V_t$  : Voltage
- V : Falling model
- $V_w$  : Water volume
- x,y : Rectangular coordinates
- $y_1$  : Falling model displacement
- $y_2$  : Membrane displacement

Greek Symbol

- $\alpha$  : Deformation coefficient
- $\beta$  : Air jet divergence angle
- $\delta$  : Water compressibility coefficient
- $\kappa$  : Isentropic compressibility coefficient
- $\mu_{air}$  : Air dynamic viscosity
- $\mu_{h_2o}$  : Water dynamic viscosity
- $\nu$  : Poisson coefficient
- $\nu_{air}$  : Air kinematic viscosity
- $\nu_{h_2o}$  : Water kinematic viscosity



$\gamma$  : Heat specific ratio  
 $\rho_a$  : Air density  
 $\rho_{atm}$  : Air density at atmospheric pressure  
 $\rho_{h_2o}$  : Water density  
 $\tau_a$  : Tangential shear stress on free surface due to air  
 $\tau_{h_2o}$  : Tangential shear stress on free surface due to water  
 $\zeta$  : Damping ratio  
 $\omega_n$  : Natural frequency

Dimensional Body, Fluid Dynamics Research. 19, pp.125-148, (1977)  
 10) Birkhoff, G. and Zarantonello, E. H. : Jets, Wake, and Cavities, Academic Press, New York, pp.298-313, (1957)  
 11) Schlichting, H. : Boundary Layer Theory, Mc Graw-Hill, New York, Seventh Edition, pp.400-503, (1980)

(2001년 5월 3일 접수, 2001년 8월 22일 채택)

### 후 기

본 연구는 1999년도 경남대학교 학술연구조성비의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- 1) Von Karman, T. : The Impact of Seaplane Floats during Landing, NACA TN321, October, Washington
- 2) Wagner, H. : Uber Stoss-und Gleitvorgange an der Oberflache von Flussigkeiten, ZAMM 12, 193 (See also Phenomena of Impact and Planning on Water NACA, Translation 1366).
- 3) Chuang, S.L. : Experimental on flat-bottom slamming, J. Ship Res.10, pp.10-17, (1966)
- 4) Verhagen, J. H. G. : The Impact of a Flat Plate on a Water Surface, Journal of Ship Research, Vol.11, pp.211-223. (1967)
- 5) Johnson, R. S. : The Effect of Air Compressibility in a First Approximation to the Ship Slamming Problem, Journal of Ship Research, Vol.12, pp.57-68, (1968)
- 6) Lewison, G. and Maclean, W. M. : On the Cushioning of Water Impact by Entrapped Air, Journal of Ship Research, Vol.12, No.2, pp. 116-130, (1968)
- 7) Koehler, B. R. and C. F. Kettleborough. : Hydrodynamic Impact of a Falling Body upon a Viscous Incompressible Fluid, J. Ship Res. 21, pp.165-181, (1977)
- 8) Ng, C O. and S. C. Kot : Computation of Water Impact on a Two-Dimensionnal Flat-Bottomed Body with a Volume-of-Fluid Method, Ocean Eng. 19, pp.377-393, (1992)
- 9) Lin, M. C and Shieh, L. D. : Simultaneous Measurements of Water Impact on a two-