

자유수면에 낙하하는 물체의 형상각에 관한 실험적 연구

이 종 봉* · 이 주 용**

An Experimental Study on the Deadrise Angle of a Falling Body upon a Free Surface Water

Jong-Boong Lee* and Ju-Yong Lee**

Key Words: Impact machine(충격실험장치), Impact pressure(충격압력), Deadrise angle(형상각)

Abstract

This study was obtained the pressure distribution of a falling body that is deadrise angle 0° and deadrise angle 5° 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 $Fo(1+\cos \pi t/tc)$.

1. 서 론

Von Karman^[1]은 1929년에 수상비행기의 착륙에 관한 충격연구에서 유체역학적 충격문제를 연구한 최초의 사람이다. 그는 물체에 의해 움직이기 시작하는 물에 부가된 명백한 질량의 개념을 도입했다.

Johnson^[2]은 낙하하는 평판블록과 편평한 무한 표면 사이의 공기의 흐름에 대해 2차원으로 설명했다. 그럼에도 불구하고 그는 충격 순간의 문제 해결을 계속해 나갈 수 없었다. 그는 실험적 결과와 일치하기 위해서는 물자유표면의 변형을 고려하는 것이 필요하다는 결론을 내렸다.

Lewis et al.^[3]은 압축성 물의 효과는 물의 비압축성 움직임 보다 중요치 않다는 것을 발견했다. Koehler et al.^[4], Ng et al.^[5]는 2중 밀도유체의 Navier-stokes 방정식을 풀기 위하여 유한차분법과 유한체적법의 개념을 적용했다. Lim et al.^[6]는 CCD카메라를 이용하여 낙하동안의 압력을 측정함과 동시에 낙하물체 주위의 현상을 활

영했다. 그리고 이들의 연구는 낙하물체의 모델의 밑면이 평면이고 압력은 최대 충격압이 발생하는 밑면의 중심압력을 구하는데만 실험되고 연구되어졌다.

본 연구는 충격현상을 가상화 시키기 위하여 충격실험장치를 개발하여 낙하물체의 형상각(deadrise angle)은 $0^\circ, 5^\circ$ 이고, 밑면 면적이 같고 종횡비가 1인 모델을 이용하여 밑면의 중심에서 일정거리까지 압력 센서를 설치하고 낙하높이(50 cm, 30 cm)가 다른 위치에서 자유낙하 시켜 수면 위에 떨어 뜨렸을 때 낙하물체 밑면 형상각의 변화에 따른 충격압력분포 특성과 공기압축의 영향을 받는 완충효과를 분석하고, 또한 충격과 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 해석되어야 한다.

* 경남대학교 기계자동화공학부 교수

** 대구공업대학 자동차과 조교수

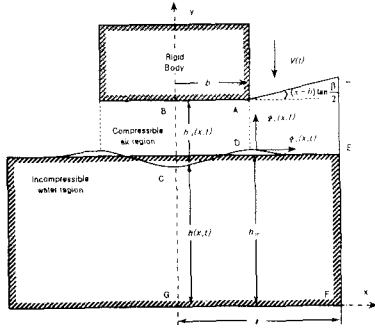


Fig. 1 General description of the impact system

2.1.1 공기영역부분(air region)

압축성 공기영역에서의 흐름은 1차원으로 고려하고 비점성 등온이다.

연속방정식은

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

운동방정식은

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

공기층의 두께는 낙하물체속도 $V(t)$ 와 시간이 지난 후 변형된 자유표면의 수직속도 성분 v_s 와 연관되어 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} h_a(x, t) = -V(t) - v_s(x, t) \quad (3)$$

2.1.2 물영역부분(water region)

비압축성 유체의 연속방정식은

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

압축성 유동에 대한 Navier-Stokes 방정식을 X, Y 방향으로 표시하면
X성분:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

Y성분:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_y \quad (6)$$

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

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = -Q \quad (7)$$

여기서

$$Q = \rho \left[\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (8)$$

2.1.3 공기-물 공유부분(air-water interface)

공유면 위의 수직속도 성분 v_s 는 연속방정식 (4)로부터 계산되어진다. u_s 의 값은 공유면 움직임의 지배방정식에서는 실제로 나타나지 않는다. 그러나 u_s 는 공유면 가까이의 속도에 영향을 미친다. 뉴우튼의 제2법칙으로부터 공유면 한 영역 위의 접선 응력의 합은 이 영역의 질량과 공유면 가속도의 곱과 같다. 이 분석에 있어서 공유면은 두께가 0이고 공유면의 질량도 0이라고 가정한다. 뉴우튼의 제 2법칙은 공유면 한 영역 위의 접선 응력의 합을 단순하게 한다. 물에서의 속도는 공기층에서의 속도보다 작기 때문에 충류로 가정한다. 뉴우튼의 점성법칙과 뉴우튼의 제 2법칙은 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

2.2.1 선형화한 모델

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

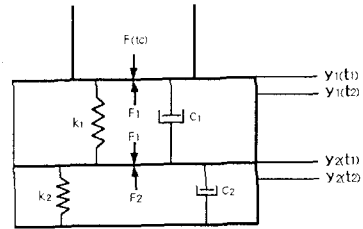


Fig. 2 Linear model of the impact system

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

$$m_2 y_2'' + k_2 y_2 + c_2 y_2' - k_1 \delta(t) - c_1 \delta'(t) = 0 \quad (9)$$

$$m_1 (\alpha y_2'' + \delta''(t)) + k_1 \delta(t) + c_1 \delta'(t) = F_{ic} \quad (10)$$

(a) 물을 비압축성 유체라고 가정하였을 경우 $(m_2 + \alpha m_1) y_2'' + k_2 y_2 + c_2 y_2' = F_{ic}$ (11)

(b) 물을 압축성 유체라고 가정하였을 경우 $m_1 \delta''(t) + (1 + \alpha m_1/m_2)(k_1 \delta(t) + c_1 \delta'(t)) - \alpha m_1/m_2 (k_2 y_2 + c_2 y_2') = F_{ic}$ (12)

$$m_2 y_2'' + k_2 y_2 + c_2 y_2' - k_1 \delta(t) - c_1 \delta'(t) = 0 \quad (13)$$

2.3 충격력 모델

수치 해석을 위한 충격력 방정식은 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_0^{+\infty} F(t) dt = m_1 V \quad (14)$$

여기서 충격력이 소멸되는 시간이 무한히 길다고 가정하면 $\lim_{t \rightarrow +\infty} F(t) = 0$ 이고, 일정 시간내에서 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
 $Ft = F_0 (1 + \cos \pi t / tc)$

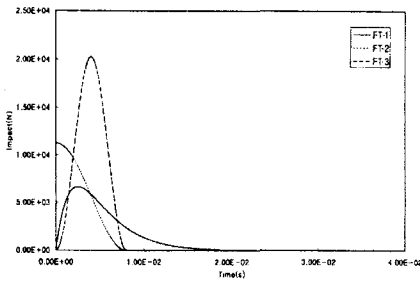


Fig.3 Exterior forces of the impacts
($m_1 V = 81.4 \text{ kg m/s}$)

3. 실험장치 및 방법

본 연구를 위한 실험장치는 충격압력과 진동변위를 측정하기 위하여 진동도르래와 연결된 전자석을 이용하여 종횡비 1, 형상각 0° , 형상각 5° 인 낙하모형을 정해진 높이까지 이동시킨 후 진원을 차단시켜 낙하모형은 수면 위에 자유 낙하하게 한다. 충격압력 측정 위치는 각 낙하모형의 중심으로부터 10 mm 간격으로 측정하였고 진동변위 측정 위치는 멤브레인 하부의 중심에서 측정하였다. 물탱크 내부 수면의 높이는 항상 일정하도록 하였으며 정적상태로 유지하기 위하여 낙하시험 시간간격을 충분히 유지하였다. 또한 실험모형의 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, 종횡비가 1, 형상각 0° , 5° 로 서로 다른 2가지 낙하모형을 사용하여 높이가 50 cm , 30 cm 에서 자유수면 위에 낙하시켰다. 탱크의 압력분포는 실험모형을 자유낙하 시키면

수면에 가까울수록 공기는 압축성으로 바뀌어 자유수면의 변형을 초래하며 낙하모형의 가장자리에는 중심으로부터 압축공기의 흐름에 의해 거품 발생 현상이 생겨 충격압력에 영향을 미치는 것으로 해석된다. Fig. 4 ~ 5은 종횡비 1, 형상각 0° , Fig. 6 ~ 7은 종횡비 1, 형상각 5° 일 때, 낙하높이 50 cm ($m_1 V = 81.4 \text{ kg m/s}$), 30 cm ($m_1 V = 63 \text{ kg m/s}$)일 때 중심부의 압력분포 특성을 나타낸다. 형상각 0° , 5° 모두 낙하높이가 낮아질수록 최대충격압력은 감소하며, 최대충격압력에 이르는 곡선의 기울기도 완만함을 보인다. 낙하높이에 따른 최대충격압력은 형상각 0° 일 때는 중심부에서, 낙하높이 50 cm 일 경우 기울기가 완만하게 변하지만 낙하높이가 30 cm 로 낮아지면 기울기가 커진다. 이것은 충격력에 영향을 미치는 자유낙하 속도가 낙하높이의 제곱근에 비례하고 낙하높이가 낮아질수록 수면과 낙하모형 사이의 이탈된 공기분사량이 적어 공기압축에 의한 거품의 발생이 많아 쿠션효과에 영향을 주는 진동 횟수가 증가하기 때문이다. 그러나 형상각 5° 일 때는 수면과 낙하모형 사이의 공기분사량이 형상각 0° 보다 많기 때문에 쿠션효과에 의한 진동의 회수도 작아서 최대 충격압력은 훨씬 크게 나타난다. 그리고 낙하높이에 따른 충격압력 감소폭이 형상각 0° 보다 작게 나타난다.

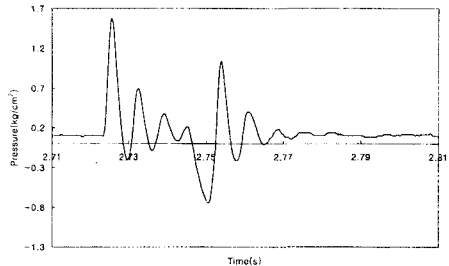


Fig. 4 Characteristic of the pressure distribution
(Deadrise Angle 0° , drop height : 50 cm , sensor position : center)

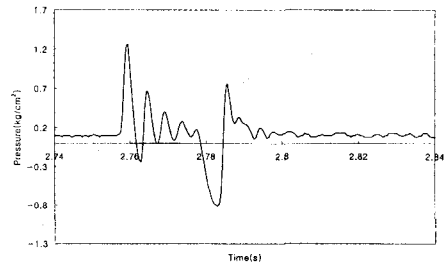


Fig. 5 Characteristic of the pressure distribution
(Deadrise Angle 0° , drop height : 30 cm , sensor position : center)

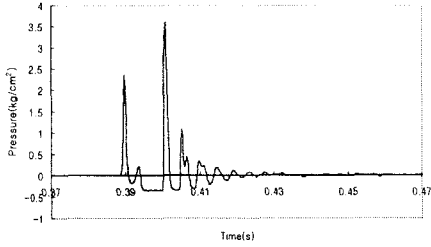


Fig. 6 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle 5° , drop height : 50 cm, sensor position : center)

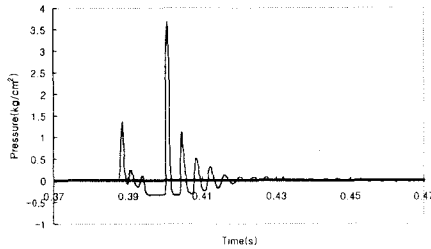


Fig. 7 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle 5° , drop height : 30 cm, sensor position : center)

Fig. 8 ~ 9는 종횡비 1, 형상각 0° , Fig. 10 ~ 11은 종횡비 1, 형상각 5° 일 때, 낙하높이 50 cm($m_i V = 81.4 \text{ kg m/s}$), 30 cm($m_i V = 63 \text{ kg m/s}$)일 때 중심과 중심으로부터 40 mm 위치의 압력분포 특성을 나타낸다. 형상각 $0^\circ, 5^\circ$ 모두 낙하높이가 낮아질수록 최대충격압력은 감소하며, 최대충격압력에 이르는 곡선의 기울기도 완만함을 보인다. 낙하높이에 따른 최대충격압력은 형상각 0° 일 때는 중심부에서, 낙하높이 50 cm 일 경우 기울기가 완만하게 변하지만 낙하높이가 30 cm로 낮아지면 기울기가 커진다. 이것은 충격력에 영향을 미치는 자유낙하 속도가 낙하높이의 제곱근에 비례하고 낙하높이가 낮아질수록 수면과 낙하모델 사이의 이탈된 공기분사량이 적어 공기압축에 의한 거품의 발생이 많아 쿠션효과에 영향을 주는 진동 횟수가 증가하기 때문이다. 낙하모델 중심으로부터 40 mm 위치의 낙하높이에 따른 최대충격압력의 차이는 중심부 보다는 상당히 작아진다. 그 이유는 낙하모델의 가장자리부근으로 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 따

른 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.

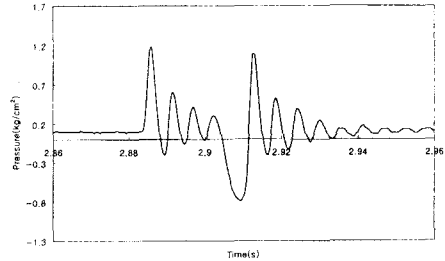


Fig. 8 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle 0° , drop height : 50 cm, sensor position : 40 mm)

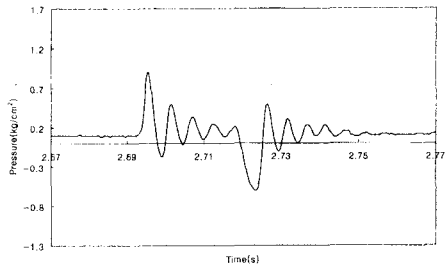


Fig. 9 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle 0° , drop height : 30 cm, sensor position : 40 mm)

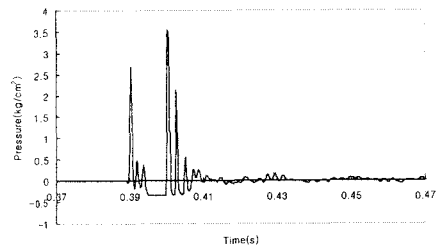


Fig. 10 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle 5° , drop height : 50 cm, sensor position : 40 mm)

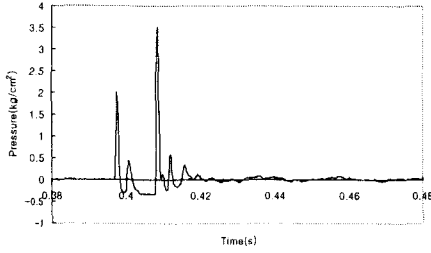


Fig. 11 Characteristic of the pressure distribution (Deadrise Angle 5° , drop height : 30 cm, sensor position : 40 mm)

Fig. 12과 Fig. 13는 종횡비 1, 형상각 0° 와 형상각 5° 일 때 센서위치와 낙하높이에 따른 충격압력의 분포를 나타낸다. 중심부의 압력분포곡선 기울기는 형상각 0° 와 형상각 5° 모두 높이가 낮아질수록 커짐을 알 수 있다. 이것은 충격압력에 영향을 미치는 자유낙하 속도가 낙하높이의 제곱근에 비례하고 낙하높이가 낮아질수록 거품발생이 많아 작은 충격압력이 더욱더 줄어들기 때문이다. 형상각 0° 일 때 같은 낙하높이에

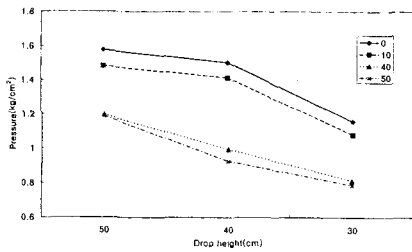


Fig. 12 Comparison of the pressure for drop height and sensor position (Deadrise Angle 0°)

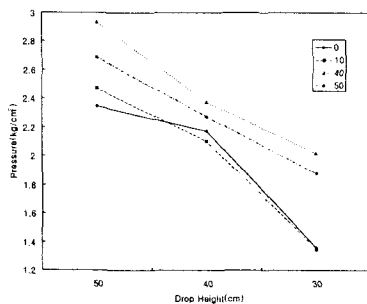


Fig. 13 Comparison of the pressure for drop height and sensor position (Deadrise Angle 5°)
서 가장자리부의 압력분포곡선의 기울기는 공기

압축에 의한 거품의 영향을 많이 받아 기울기가 일정하게 조금씩 줄어든다. 그러나 형상각 5° 일 때는 형상각 0° 일 때보다 최대 충격압력이 훨씬 크게 나타나며, 또한 중심부보다 가장자리부에서 충격압력이 더 크게 나타난다. 이것은 공기분사량이 형상각 0° 보다 많고 또 공기압축에 의한 수면파의 발생에 의해 가장자리부가 중심부보다 수면에 먼저 충돌하기 때문이다.

4.2 진동변위

4.2.1 압축성해석

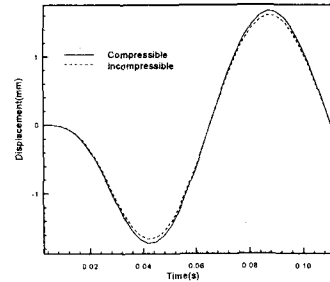


Fig. 14 Comparison of compressibility and incompressibility of the water

물탱크 속의 물을 압축성으로 간주하거나 또는 비압축성 유체로 볼 때 멤브레인 변위를 식(11)와 식(12), (13)의 수치해석 결과를 Fig. 14에서 비교하였다. 압축성 해석에서 물을 압축성 유체 또는 비압축성 유체로 간주할 때 변위의 차이가 거의 없다. 이것은 물의 스프링상수가 2.7×10^8 으로 아주 크기 때문이다. 또한 이것은 Lewison et al.^[3]의 실험에서 압축성 물의 효과는 물의 비압축성 움직임과 거의 차이가 없다는 해석과도 일치한다.

4.2.2 이론 모델 해석

(a) 충돌시간(impact time) 선정

충격력 형태 $Ft = Fd(1 - \cos 2\pi t/c)$ 와 충격량 $m_i V = 81.4 \text{ kg m/s}$ 를 충돌시간 8 ms와 12 ms 일 때 멤브레인 변위에 대한 수치해석의 결과와 실험치를 Fig. 15에 나타내었다.

충격력 형태 $Ft = Fd(1 + \cos \pi t/c)$ 와 충격량 $m_i V = 81.4 \text{ kg m/s}$, 8 ms는 최대변위량의 수치해석결과가 실험치에 비해 조금 적으나 주기는 실험치와 거의 일치함을 나타낸다.

충격력 형태 $Ft = Fd(1 + \cos \pi t/c)$ 와 충격량 $m_i V = 72.8 \text{ kg m/s}$ 를 충돌시간 8 ms일 때 멤브레인 변위에 대한 수치해석결과와 실험치를 Fig. 16에 나타내었다. 최대 변위량의 실험치가 수치해석 결과에 비해 조금 적으나 주기는 실험치와 거의 일치함을 보인다.

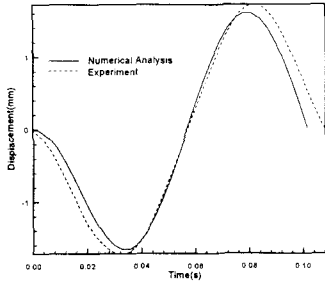


Fig. 15 Comparison of the membrane for numerical analysis and experiment (impact time : 8 ms, drop height : 50 cm, impact type : FT-3)

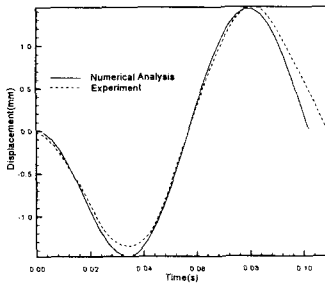


Fig. 16 Comparison of the membrane for numerical analysis and experiment (impact time : 8 ms, drop height : 40 cm, impact type : FT-3)

(b) 충격력형태 선정

Fig. 15과 Fig. 16에서 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 낙하물체의 종횡비 1, 형상각 0°와 형상각 5°인 낙하모형을 이용하여 밑면의 중심에서 일정거리까지 압력 센서를 설치하고 낙하높이(50 cm, 30 cm)가 다른 위치에서 낙하

시켜, 압력분포 특성을 해석하고, 멤브레인 진동 변위를 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.

참고문헌

- (1) Von Karman, T., 1929, "The Impact of Seaplane Floats during Landing," NACA TN321, October, Washington
- (2) Johnson, R. S., 1968, "The Effect of Air Compressibility in a First Approximation to the Ship Slamming Problem," Journal of Ship Research, Vol. 12, pp. 57-68.
- (3) Lewison, G. and Maclean, W. M., 1968, "On the Cushioning of Water Impact by Entrapped Air," Journal of Ship Research, Vol. 12, No. 2, pp. 116-130.
- (4) Koehler, B. R. and C. F. Kettleborough., 1977, "Hydrodynamic Impact of a Falling Body upon a Viscous Incompressible Fluid," J. Ship Res. 21, pp. 165-181.
- (5) Ng, C O. and S. C. Kot., 1992, "Computation of Water Impact on a Two-Dimensionnal Flat- Bottomed Body with a Volume-of-Fluid Method," Ocean Eng. 19, pp. 377-393.
- (6) Lin, M. C and Shieh. L. D., 1977, "Simultaneous Measurements of Water Impact on a two- Dimensional Body," Fluid Dynamics Research. 19, pp. 125-148.