

# 동요하는 탱크의 내부 변동압력 추정에 관한 연구

이 승 건\* · 서 영 석\*\*

\*부산대학교 조선해양공학과 교수, \*\*부산대학교 대학원 조선해양공학과

## On the Prediction of Inner Pressure for the Tank in Rolling Motion

Seung-Keon Lee\* · Young-seok Sea\*\*

\*Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

\*\*Graduate school, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

**요 약** : 강제 횡동요 실험을 통하여 동요하는 탱크의 내부압력을 측정하고, 탱크의 내부압력을 추정하는 간단한 이론식을 제시하였다. 청수로 채워진 사각 탱크를 동요실험에 사용하였으며, 탱크의 안쪽 벽과 바닥에 압력게이지를 설치하여 내부압력의 시간변화량을 측정하였다. 측정된 탱크의 내부압력의 실험값과 이론식을 이용한 계산값을 비교하였다. 횡동요 하는 탱크내부의 압력을 구하기 위해 압력중심을 고려하여 추정하는 방법을 연구하였다.

**핵심용어** : 강제동요, 탱크, 내부압력, 슬로싱, 추정

**Abstract** : The inner liquid pressure of an airtight tank in rolling motions is investigated by means of forced oscillation tests, and the simple method to estimate the inner liquid pressure is proposed. A rectangular solid tank, which is fully filled with water, was used in the forced oscillation test of rolling motion. The inner pressure variations in time were measured at several points on the inner walls of tank. Measured pressures are compared with the calculated ones, and estimation methods of the inner liquid pressure of the tank in rolling motion are studied based on the considerations of the origin of pressure.

**Key words** : rolling motion, tank, inner pressure, sloshing, prediction

### 1. 서 론

선체 구조 설계에 있어, 구조물에 작용하는 정확한 하중을 예측하는 것은 아주 중요한 문제이다. 더욱이 구조물에 작용하는 하중이 시간에 따라 변할 때, 그 변하는 하중을 정확하게 예측하는 것은 피로강도설계에서 중요하다. 파랑 등에 인한 선체 외부에 작용하는 하중에 대한 연구는 많이 수행되어져 왔으며 그 하중의 특성도 자세히 밝혀졌다. 반면에 액체화물 등으로 인한 선체 내부의 압력에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았으며, 선체의 피로강도 설계를 위한 내부압력의 추정에는 여러 가지 어려움이 존재한다.

선체의 탱크나 화물창이 액체로 부분적으로 채워진 경우, 슬로싱(Sloshing)현상이 발생하며 화물창의 국부강도나 선박의 거동에 큰 영향을 미치게 된다. 반면에 탱크가 액체로 완전히 채워진 경우에는, 단순히 중력과 선체의 운동 가속도에 의한 압력만이 발생한다. 탱크의 횡동요에 의한 내부유체의 압력변동은 탱크구조의 피로강도에 영향을 미치게 된다. 따라서 선박의 피로강도 설계시 이 변동압력을 정확하게 추정할 필요가 있다.

가 있다. 탱크가 가득 채워진 경우의 압력을 추정하기 위해, "압력중심"이 필요하게 되고, 본 논문에서 압력중심은 압력이 항상 0인 위치로 정의하였다. 그리고 실험에 의해 압력중심을 예측할 수 있는 몇 가지 방법이 제안되었다 (Toyama et al.,1998, Nagamoto et al.,1980, Kuramoto et al.,1991). 하지만 위 논문들은 주로 좌우동요, 상하동요 운동에 대하여 다루고 있으며, 본 논문에서는 횡동요 운동을 하는 탱크의 내부압력을 측정하였으며, 간단한 압력 추정법을 제시한다.

### 2. 모델실험

직육면체의 탱크를 사용하여, 강제 횡동요 실험을 행하였으며, 실험 장치의 구성은 Fig. 1에 나타나 있다. 횡동요 운동의 회전중심은 탱크바닥에서 아래로 30mm 떨어진 곳에 위치해 있으며, 탱크 바닥과 측면에서 각각 6곳씩의 압력을 측정하였다. 압력측정은 스트레인 게이지타입의 압력센서를 사용하였으며, 압력센서로부터 나온 신호는 A/D 변환기를 거쳐 PC에 저장된다. 탱크상부에는 Air-pipe를 장착할 수 있는 3개의 Hole이 있다.

\* 대표저자 : 이승건(정회원), leesk@pusan.ac.kr 051)510-2441

\*\* meele@hotmail.com 051)510-2755

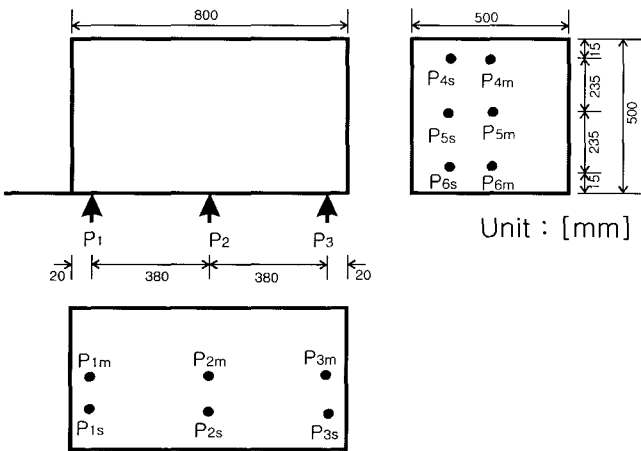
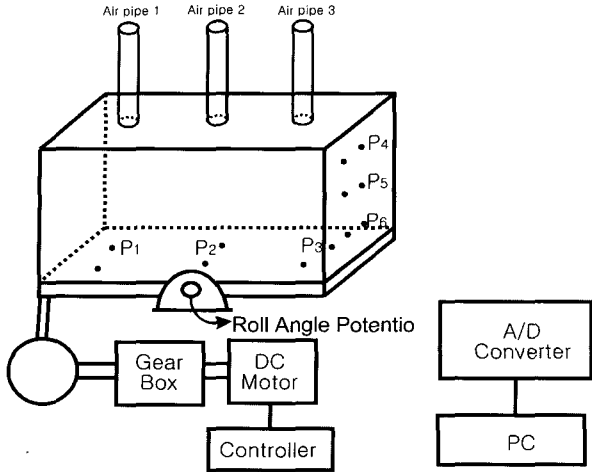


Fig. 1 Setup of experimental device of rolling

강제 횡동요 실험은 압력센서의 위치, 단면적과 Air-pipe의 위치를 변화시켜가며 실험을 행하였다. 탱크내부 벽면 중앙 [P1c, P2c, P3c, P4c, P5c, P6c]과 그 외 위치[P1s, P2s, P3s, P4s, P5s, P6s]에 압력계를 설치하여 그 곳의 압력을 각각 측정하였다. 또 횡동요 각도는 10°, 21°, 횡동요 주기는 2sec, 4sec 인 경우에 대하여 실험을 행하였다. Table. 1은 각 실험에 대한 진폭을 나타내었다.

### 3. 내부 변동압력 추정

횡동요 운동을 하는 탱크의 내부 유체압력은 두 가지 성분으로 나눌 수 있으며, 횡동요 가속도에 기인한 동적 성분과, 탱크가 기울어 질 때 중력가속도 벡터 방향의 변화로 인한 정적성분이다. 일반적으로, 동적성분이 정적성분에 비해 작다. Fig. 2와 같은 좌표계를 사용하였다. 이 좌표계에서 수평, 수직 가속도는 다음과 같이 나타내었다.

$$\ddot{y} = \ddot{\eta} - z\ddot{\phi} \quad (1)$$

$$\ddot{z} = \ddot{\zeta} + y\ddot{\phi} \quad (2)$$

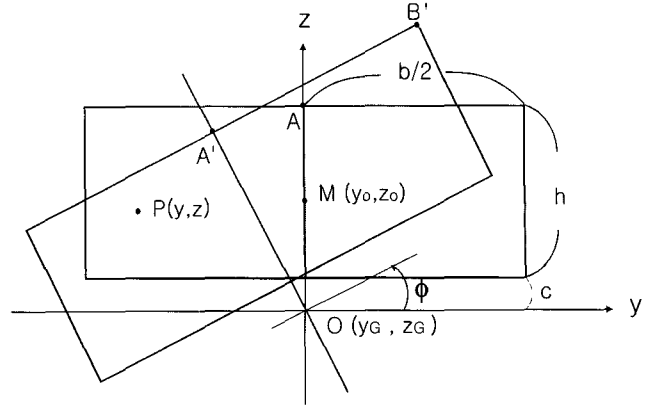


Fig. 2 Coordinate system

여기서  $\ddot{\eta}$ ,  $\ddot{\zeta}$ ,  $\ddot{\phi}$  는 탱크의 상대적인 좌우동요, 상하동요, 횡동요 가속도이다. 좌우동요, 상하동요 가속도가 단지 탱크의 경사에 의해서 발생한다고 가정하자. 그러면 좌우동요, 상하동요 가속도는 좌표계에서 수직, 수평방향 중력가속도 벡터가 될 것이다. 그러면 식(1), 식(2)는 다음과 같이 된다.

$$\ddot{y} = -g \sin \phi + \omega^2 z \phi \quad (3)$$

$$\ddot{z} = -g \cos \phi - \omega^2 y \phi \quad (4)$$

여기서 횡동요 운동은 각 주파수  $\omega$ 를 가지는 단순 조화 운동으로 가정했다. 식(3), 식(4)로서 전체압력은 식 (5)와 같다.

$$P = \rho(y - y_0)\ddot{y} + \rho(z - z_0)\ddot{z} \quad (5)$$

여기서  $\rho$ 는 유체의 밀도이며  $(y_0, z_0)$ 는 “압력중심” 이다. 전체압력  $P$ 는 정적성분  $P_S$ 와 동적성분  $P_D$ , 두 가지 성분으로 나누어지며 다음과 같다.

$$P_S = -\rho g(y - y_0)\phi - \rho g(z - z_0) \quad (6)$$

$$P_D = -\rho \omega^2 \phi (zy_0 - yz_0) \quad (7)$$

Table 1 Amplitude of pressure in various condition

Roll Ang.	Per-iod (sec.)	Pipe diame-ter (mm)	Pressure gage							
			Center of Tank				Side of Tank			
			P <sub>1C</sub>	P <sub>2C</sub>	P <sub>4C</sub>	P <sub>6C</sub>	P <sub>1S</sub>	P <sub>2S</sub>	P <sub>4S</sub>	P <sub>6S</sub>
10°	2	0	1.03	0.15	1.19	1.26	1.07	0.15	1.26	1.26
		25	1.10	0.25	1.31	1.42	1.11	0.23	1.49	1.42
		50	1.29	0.47	1.63	1.71	1.30	0.52	1.57	1.63
	4	0	0.83	0.15	1.09	1.08	0.87	0.16	1.14	1.09
		25	0.94	0.30	1.29	1.25	0.92	0.25	1.30	1.21
		50	1.07	0.38	1.40	1.32	1.13	0.34	1.46	1.31
21°	2	0	2.31	0.36	2.40	2.44	2.28	0.35	2.31	2.44
		25	2.68	1.21	3.86	3.93	2.62	1.06	3.81	3.78
		50	2.88	1.17	3.91	3.91	2.68	1.09	4.13	3.73
	4	0	1.75	0.23	2.02	2.10	1.80	0.29	2.00	2.10
		25	1.85	0.59	2.77	2.39	2.04	0.78	2.94	2.61
		50	2.37	0.91	3.21	2.94	2.17	0.73	3.02	2.82

여기서 횡동요 각도는 작다고 가정한다.

탱크에 Air-pipe가 없을 때, 정압력 성분의 압력중심은 탱크의 상면에 위치(Fig. 2, A)하고, 동압력 성분의 압력중심은 탱크의 중앙(Fig. 2, M)에 위치한다고 가정하면, 전체압력 P는 다음과 같다.

$$P = -\rho g y \phi + \rho g (h + c - z) + \rho \omega^2 y \left( \frac{h}{2} + c \right) \phi \quad (8)$$

여기서 h는 탱크의 높이이며, c는 탱크의 회전중심에서 탱크의 밑면까지의 거리이다. 위 (8)식을 식 I 이라고 하자.

탱크상면의 모든 Hole에 Air-pipe를 장착했을 때, Air-pipe에 자유표면이 존재한다. 이때 정압력 성분의 압력중심은 탱크의 회전운동에 따라 변한다. 따라서 탱크의 최상위 위치(Fig. 2, B)가 정압력 성분의 압력중심이며, 동압력성분의 압력중심은 탱크의 중앙(Fig. 2, M)이라고 가정하면 전체압력 P는 다음과 같다.

$$P = -\rho g y \phi + \rho g (h + c - z) + \rho g \frac{b}{2} \phi + \rho \omega^2 y \left( \frac{h}{2} + c \right) \phi \quad (9)$$

위 식(9)를 식 II 라고 하자.

#### 4. Tank 내부압력 실험결과 및 추정식과의 비교

Air-pipe를 장착하지 않은 경우, 식 I 을 사용한 추정치와 그때의 실험치를 Fig. 3에서 Fig. 6 에 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 4는 roll angle이 10°, 횡동요의 주기가 2초일 때의 압력의 시간변화량을 나타내고 Fig. 5와 Fig. 6은 roll angle 10°에서 횡동요의 주기가 4초일때의 압력의 시간변화량이다. 식 I 을 사용한 추정식이 실험치와 모든 위치에서 비슷한 결과를 보여주고 있다.

탱크상부에 Air-pipe를 모두 장착한 경우에 대한 결과를 Fig. 7에서 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 7과 Fig. 8은 roll angle이 10°, 횡동요의 주기가 4초일 때의 압력의 시간변화량을 나타내고 Fig. 9와 Fig. 10은 roll angle 21°에서 횡동요의 주기가 4초일때의 압력의 시간변화량이다. 이때 식 II 를 사용한 추정결과가 실험치와 아주 유사함을 볼 수 있다.

Fig. 3, Fig. 5, Fig. 7, Fig. 9에서는 압력센서가 중앙에 위치(P1m, P4m)해 있을 경우 이며 Fig. 4, Fig. 6, Fig. 8, Fig. 10은 그 외의 위치(P1s, P4s)에서의 경우이다. 위 그림들로부터 탱크의 길이 방향으로의 압력 변동은 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 11에서는 roll angle이 10°, 횡동요의 주기가 4초일 때의 Air-pipe의 단면적의 변화에 따른 압력 변동을 보여주고 있다. 여기서 Air-pipe의 단면적에 따라 압력값이 변하는 것을 알 수 있다. Air-pipe가 있는 경우에는, 탱크의 횡동요 할 때, 탱크 내의 정수가 파이프내로 들어가서 탱크 내에 정수에 부분적으로 자유표면이 생기게 되는데, 이로 인하여 유체의 유동성분이 증가하게 된다. 이 유동성분으로 인하여 동적압력의 변화도 증가한다. Table. 1에서 볼 수 있듯이, 전체적으로

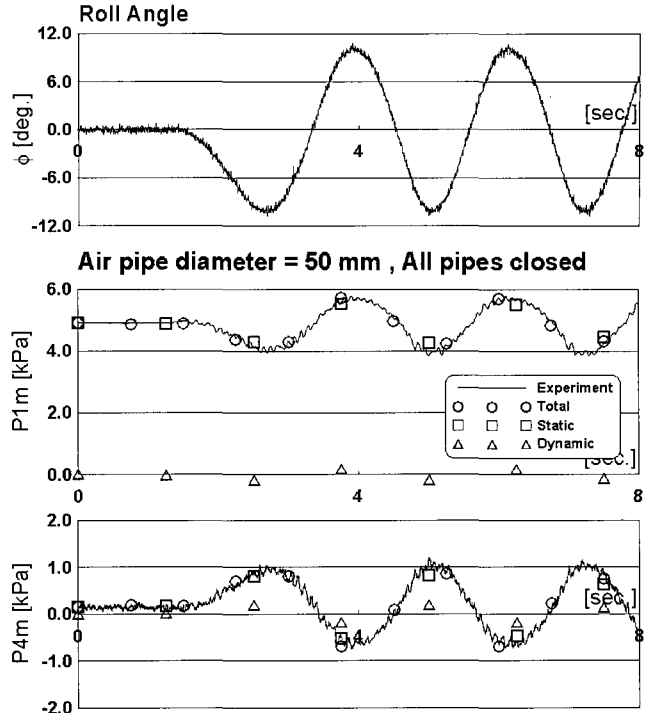


Fig. 3 Comparison of pressure time history ; Measured and calculated by Formula-I (roll period=2 sec., roll ang.=10° sensor location : middle)

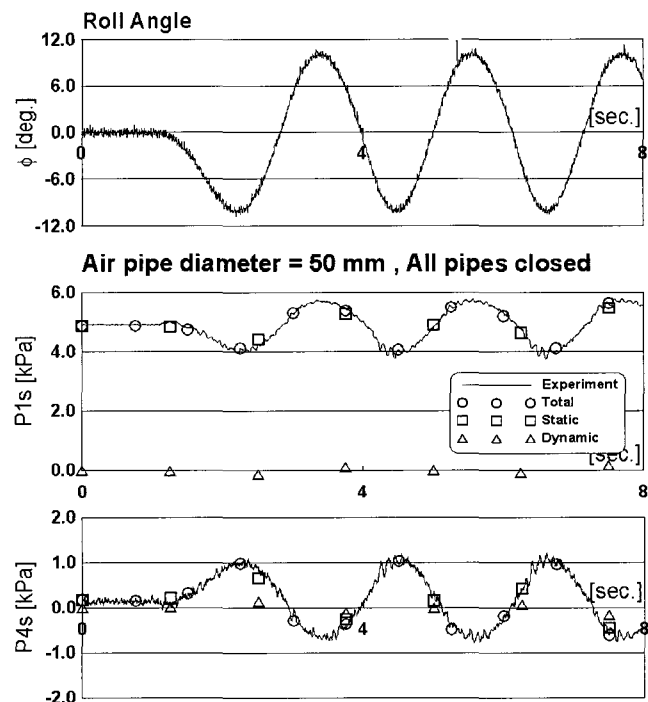


Fig. 4 Comparison of pressure time history ; Measured and calculated by Formula-I (roll period=2 sec., roll ang.=10° sensor location : side)

air-pipe의 지름이 커질수록 압력 진폭값이 커지는 걸 볼 수 있다. 이 변화에 따른 일반적인 진폭의 변화는 최대 20%정도로 추정되었다.

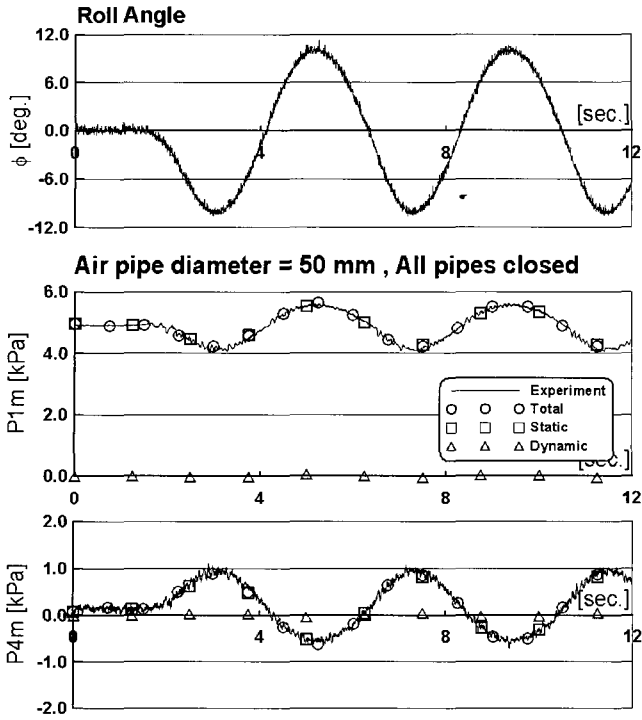


Fig. 5 Comparison of pressure time history ; Measured and calculated by Formula-I (roll period=4 sec., roll ang.=10° sensor location : middle)

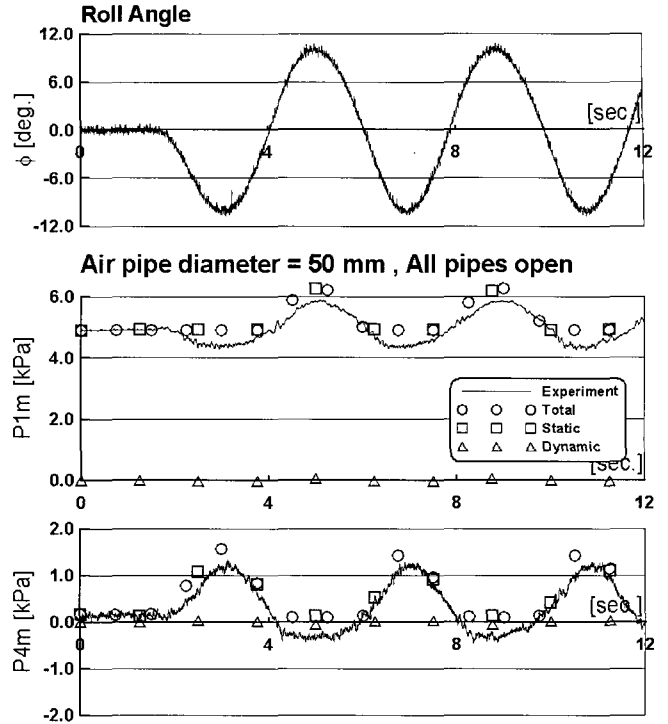


Fig. 7 Comparison of pressure time history ; Measured and calculated by Formula-II (roll period=4 sec., roll ang.=10° sensor location : middle)

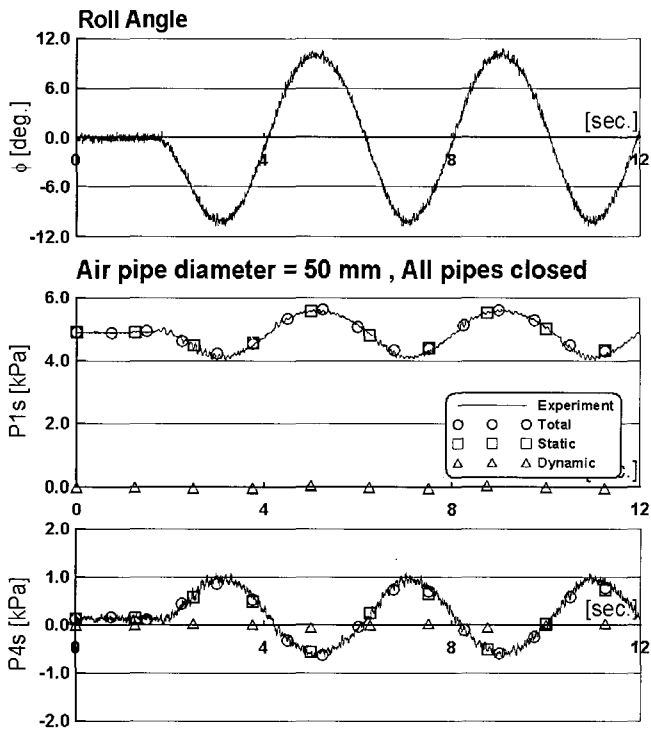


Fig. 6 Comparison of pressure time history ; Measured and calculated by Formula-I (roll period=4 sec., roll ang.=10° sensor location : side)

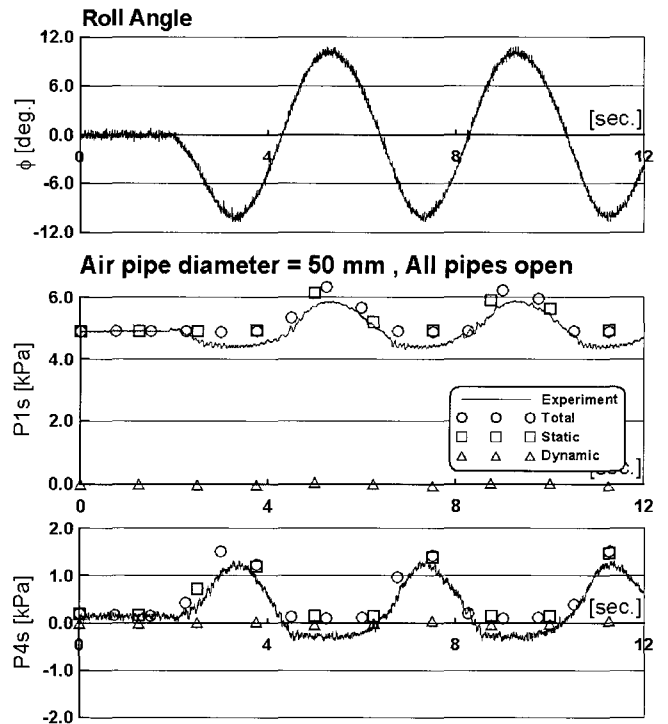


Fig. 8 Comparison of pressure time history ; Measured and calculated by Formula-II (roll period=4 sec., roll ang.=10° sensor location : side)

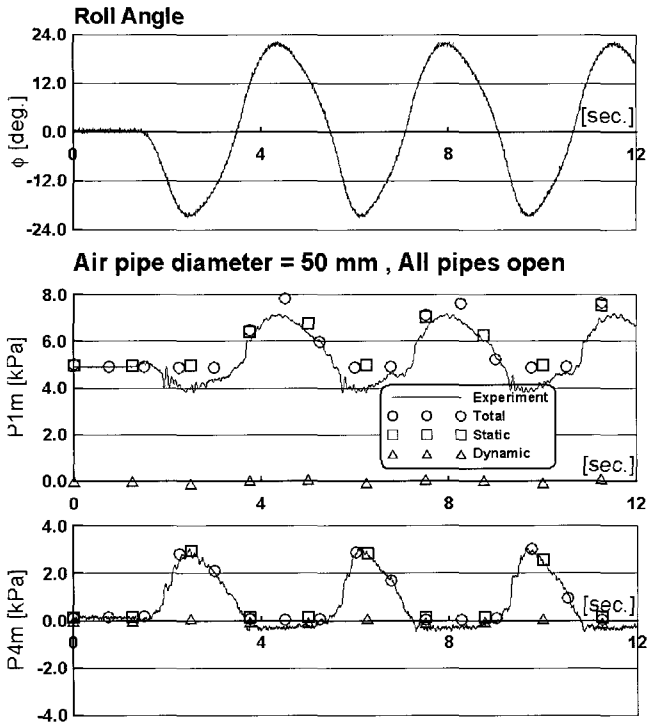


Fig. 9 Comparison of pressure time history ; Measured and calculated by Formula-II (roll period=4 sec., roll ang.=21° sensor location : middle)

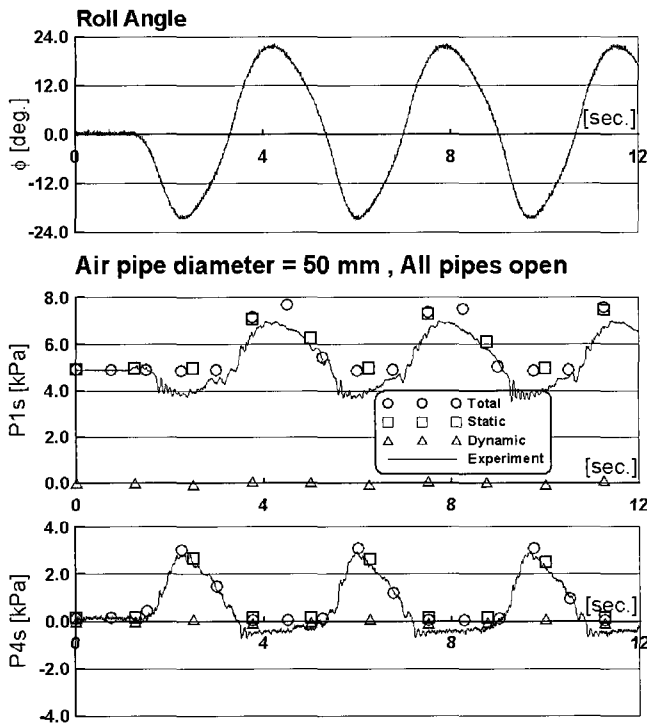


Fig. 10 Comparison of pressure time history ; Measured and calculated by Formula-II (roll period=4 sec., roll ang.=21° sensor location : side)

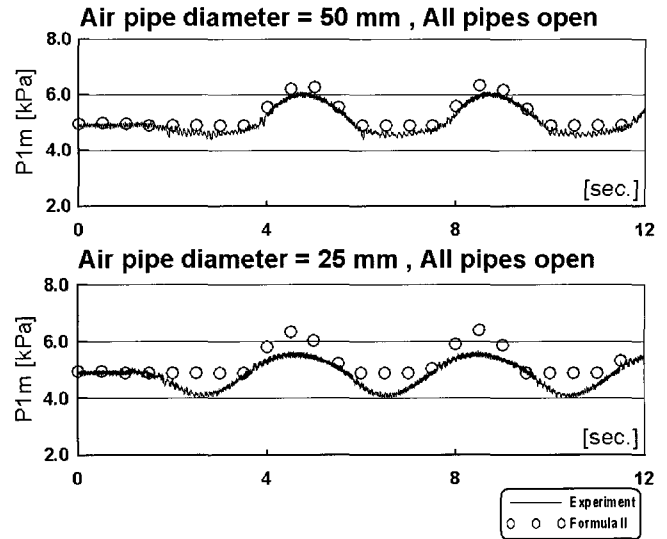


Fig. 11 Pressure variation by air-pipe diameter ; Measured and calculated by Formula-I (roll period=4 sec., roll ang.=10° sensor location : middle)

### 5. 결론

액체로 가득찬 용기내의 유체압력을 추정하기 위하여, 모형 시험 및 이론적 계산방법에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 자유표면이 없는 경우 동요하는 탱크내부 압력은 압력중심을 (A, M)에 놓은 식 I 로서 추정가능하고, 자유표면이 있는 경우는 압력중심을 (B', M)에 놓은 식 II 로서 추정 가능하다.
- (2) Air-pipe의 단면적 변화에 따라 압력값이 변하며, 이 변화에 따른 진폭의 변화는 최대 20%정도이다. 이는 자유표면이 있는 경우 유체의 유동성분이 증가하여, 동적 압력 변화가 커지기 때문이라 생각된다.
- (3) 밀폐된 용기내의 유체 변동 압력은 정적성분이 큰 몫을 차지하고, 동적 영향은 최대 6%정도이다.

### 후 기

본 연구는 부산대학교 연구(보조)비 (4년과제)에 의한 연구임.

### 참 고 문 헌

[1] Ryuichi Nagamoto, Takeshi Takahashi, Akinobu Kawamura and Toshio Yamashita (1980) "On the Design Pressure for Transverse Members by Wave Induced External Pressure and Internal Liquid Pressure

- due to Ship's Motion", Trans. West-Japan Soc. of Naval Arch., No.59(in Japanese)
- [2] Yasumi Toyama and Tomoko Akashi (1998) "A Method to Estimate Internal Pressure of Fluid Cargo in Ship Tanks", J. Kansai Soc. Naval Arch. of Japan, No.229(in Japanese)
- [3] Yoshio Kuramoto, Shigeru Tozawa, Hirosh Shirakihara, Shunji Inoue and Akira Fushimi (1991) "Study on the Load-Stress Simulation Method for Ship Structure in Waves", J. Soc. Naval Arch. of Japan, Vol. 170(in Japanese)

---

원고접수일 : 2003년 5월 20일

원고채택일 : 2003년 10월 7일