



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

**사각탱크 내 슬로싱 저감을 위한 투과성
내부재 효과에 관한 실험적 연구**

제주대학교 대학원

해양시스템공학과

현 중 우

2015년 8월

사각탱크 내 슬로싱 저감을 위한 투과성

내부재 효과에 관한 실험적 연구

지도교수 조일형

현 중 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2015년 8월

김한수의 공학석사 학위논문을 인준함

심사위원장 배 진 호 인

위 원 배 윤 혁 인

위 원 조 일 형 인

제주대학교 대학원

2015년 8월

**The Experimental Study of Porous
Baffle Effect for Sloshing Reduction on
Rectangular Tank**

Jong - Wu Hyeon

(Supervised by Professor Il - Hyoung Cho)

A Thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for degree of Master of Engineering

Department of Ocean System Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2015. 8

목 차

LIST OF FIGURES	3
LIST OF TABLES.....	11
요약문	12
ABSTRACT	13
제 1 장 서 론	15
1. 1 연구배경	15
1. 2 선행연구	17
1. 3 연구내용	19
제 2 장 이론해석	21
2. 1 문제의 정식화.....	21
2. 2 경계요소법.....	24
제 3 장 모형실험	29
3. 1 실험장비	29
3. 2 실험방법	36
제 4 장 실험결과	41
4. 1 순수한 탱크 내 슬로싱	41

4. 2 타공판 실험.....	45
4. 3 슬릿판 실험.....	84
제 5 장 결론 및 향후 연구	87
참고문헌	90
감사의 글	93

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Definition sketch of a rectangular tank with a porous baffle placed at center	21
Fig. 2.2 Definition sketch of boundaries and elements.....	25
Fig. 3.1 Design sheet and experimental model of device for actuating the rectangular tank	30
Fig. 3.2 3-D sketch and photograph of a rectangular tank model.....	31
Fig. 3.3 Detailed sheet of punched plate (left) and slotted plate (right).....	32
Fig. 3.4 Experiment model of the punched plate (left) and slotted plate (right) .	33
Fig. 3.5 Relation between the voltage and pressure.....	36
Fig. 3.6 Installation photograph of the pressure gauge on tank wall.....	36
Fig. 3.7 Snapshot of the Image tracking for measuring water elevation.....	37
Fig. 3.8 Time series of the tank's sway motion, wave elevation and pressure (amplitude: 0.3cm, period: 0.6s).....	38
Fig. 3.9 3D sketch and snapshot of experimental set-up	39
Fig. 3.10 Position and number of baffles used at model test.....	40
Fig. 4.1 Comparison of amplification ratio between the experimental and numerical results.....	43
Fig. 4.2 Comparison of the pressure between the experimental and numerical results	44
Fig. 4.3 Comparison of amplification ratio($x = -a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P=0.0567, d/h=1.0$)	46
Fig. 4.4 Comparison of amplification ratio($x = -a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.0816, d / h = 1.0$)	46

Fig. 4.5 Comparison of amplification ratio($x = -a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.1275, d / h = 1.0$)	47
Fig. 4.6 Comparison of amplification ratio($x = -a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.2267, d / h = 1.0$)	47
Fig. 4.7 Comparison of amplification ratio($x = -a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.3265, d / h = 1.0$)	48
Fig. 4.8 Comparison of the amplification factor as function of porosities of porous baffle($d / h = 1.0$)	48
Fig. 4.9 Comparison of amplification ratio($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.0567, d / h = 1.0$)	50
Fig. 4.10 Comparison of amplification ratio($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.1275, d / h = 1.0$)	50
Fig. 4.11 Comparison of amplification ratio($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.3265, d / h = 1.0$)	51
Fig. 4.12 Comparison of pressure($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.0567, d / h = 1.0$)	52
Fig. 4.13 Comparison of pressure($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center	

	$(P = 0.1275, d / h = 1.0)$	52
Fig. 4.14	Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center	
	$(P = 0.3265, d / h = 1.0)$	53
Fig. 4.15	Comparison of the measured pressure as function of porosities of porous baffle ($d / h = 1.0$)	53
Fig. 4.16	Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center	
	$(P = 0.0567, d / h = 0.5)$	55
Fig. 4.17	Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center	
	$(P = 0.1275, d / h = 0.5)$	55
Fig. 4.18	Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center	
	$(P = 0.3265, d / h = 0.5)$	56
Fig. 4.19	Comparison of the amplification factor as function of porosities of porous baffle ($d / h = 0.5$)	56
Fig. 4.20	Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center	
	$(P = 0.0567, d / h = 0.5)$	57
Fig. 4.21	Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center	
	$(P = 0.1275, d / h = 0.5)$	58
Fig. 4.22	Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center	
	$(P = 0.3265, d / h = 0.5)$	58

Fig. 4.23 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.0567, d / h = 0.5$)	59
Fig. 4.24 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.1275, d / h = 0.5$)	59
Fig. 4.25 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.3265, d / h = 0.5$)	60
Fig. 4.26 Comparison of the pressure as function of porosities of porous baffle ($d / h = 0.5$)	60
Fig. 4.27 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.0567, d / h = 1.0$)	62
Fig. 4.28 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.1275, d / h = 1.0$)	62
Fig. 4.29 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.3265, d / h = 1.0$)	63
Fig. 4.30 Comparison of the amplification factor as function of porosities of two porous baffles ($d / h = 1.0$)	63
Fig. 4.31 Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.0567, d / h = 1.0$)	64
Fig. 4.32 Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$	

	$(P = 0.1275, d / h = 1.0)$	64
Fig. 4.33	Comparison of amplification ratio($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$	
	$(P = 0.3265, d / h = 1.0)$	65
Fig. 4.34	Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$	
	$(P = 0.0567, d / h = 1.0)$	66
Fig. 4.35	Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$	
	$(P = 0.1275, d / h = 1.0)$	66
Fig. 4.36	Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$	
	$(P = 0.3265, d / h = 1.0)$	67
Fig. 4.37	Comparison of the pressure as function of porosities of two porous baffles($d / h = 1.0$).....	67
Fig. 4.38	Comparison of amplification ratio($x = -a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$	
	$(P = 0.0567, d / h = 0.5)$	68
Fig. 4.39	Comparison of amplification ratio($x = -a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$	
	$(P = 0.1275, d / h = 0.5)$	69
Fig. 4.40	Comparison of amplification ratio($x = -a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$	
	$(P = 0.3265, d / h = 0.5)$	69
Fig. 4.41	Comparison of the amplification factor as function of porosities of two porous baffles($d / h = 0.5$)	70

Fig. 4.42 Comparison of amplification ratio($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.0567, d / h = 0.5$)	70
Fig. 4.43 Comparison of amplification ratio($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.1275, d / h = 0.5$)	71
Fig. 4.44 Comparison of amplification ratio($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.3265, d / h = 0.5$)	71
Fig. 4.45 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.0567, d / h = 0.5$)	72
Fig. 4.46 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.1275, d / h = 0.5$)	73
Fig. 4.47 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.3265, d / h = 0.5$)	73
Fig. 4.48 Comparison of the pressure as function of porosities of two porous baffles($d / h = 0.5$)	74
Fig. 4.49 Comparison of amplification ratio($x = -a$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm, \pm 18cm$ ($P_{inside} = 0.2267, P_{outside} = 0.1275, d / h = 1.0$)	76
Fig. 4.50 Comparison of amplification ratio($x = -a$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm, \pm 18cm$ ($P_{inside} = 0.1275, P_{outside} = 0.2267, d / h = 1.0$)	76

Fig. 4.51 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm, \pm 18cm$ ($P_{inside} = 0.2267, P_{outside} = 0.1275, d / h = 1.0$)	77
Fig. 4.52 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm, \pm 18cm$ ($P_{inside} = 0.1275, P_{outside} = 0.2267, d / h = 1.0$)	77
Fig. 4.53 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm, \pm 18cm$ ($P_{inside} = 0.2267, P_{outside} = 0.1275, d / h = 0.5$)	78
Fig. 4.54 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm, \pm 18cm$ ($P_{inside} = 0.1275, P_{outside} = 0.2267, d / h = 0.5$)	79
Fig. 4.55 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm, \pm 18cm$ ($P_{inside} = 0.2267, P_{outside} = 0.1275, d / h = 0.5$)	79
Fig. 4.56 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm, \pm 18cm$ ($P_{inside} = 0.1275, P_{outside} = 0.2267, d / h = 0.5$)	80
Fig. 4.57 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) according to the motion amplitudes of a tank for single porous baffle placed at the center ($P = 0.1275, d / h = 1.0$)	81
Fig. 4.58 Time series of the wave elevation ($x = -a$) for single porous baffle placed at center ($P = 0.1275, d / h = 1.0, amplitude : 0.2cm, period : 0.8s$) ..	82
Fig. 4.59 Amplitude spectrum of wave elevation for single porous baffle placed at center ($P = 0.1275, d / h = 1.0, amplitude : 0.2cm, period : 0.8s$)	82
Fig. 4.60 Time series of the wave elevation ($x = -a$) for single porous baffle	

placed at center ($P=0.1275, d/h=1.0, \text{amplitude}:0.4\text{cm}, \text{period}:0.8\text{s}$) ..	83
Fig. 4.61 Amplitude spectrum of wave elevation for single porous baffle placed at center ($P=0.1275, d/h=1.0, \text{amplitude}:0.4\text{cm}, \text{period}:0.8\text{s}$)	83
Fig. 4.62 Comparison of the amplification factor and measured pressure as function of porosities of porous baffle($d/h=1.0$)	85
Fig. 4.63 Comparison of the amplification factor and measured pressure as function of porosities of porous baffle($d/h=0.5$)	85
Fig. 4.64 Comparison of the amplification factor and measured pressure as function of porosities of two porous baffles($d/h=1.0$)	86
Fig. 4.65 Comparison of the amplification factor and measured pressure as function of porosities of two porous baffles($d/h=0.5$)	86

LIST OF TABLES

Table 3.1 Specification of porous baffles used in the sloshing test.....	33
Table 3.2 Experimental conditions in model tests.....	39

요약문

배, 비행기, 자동차 등 여러 운송수단들은 이동 중에 바람, 파도 등과 같은 외력이 작용하면 탱크 내에 채워진 유체의 유동이 일어나 운송수단의 내구성과 안정성에 악영향을 미칠 수 있다. 이러한 현상을 슬로싱(Sloshing) 현상이라 한다. 본 논문에서는 탱크 내 슬로싱 현상을 줄이는 방법으로 직립형 투과성 내부재를 사용하였다. 투과성 내부재의 특성에 따른 슬로싱 억제 효과를 확인하기 위하여 내부재의 종류, 공극율, 설치 개수와 배치 방법 등을 변경하면서 모형실험을 수행하였다. 모형실험을 통하여 측정된 탱크 내 수위와 압력은 경계요소법(Boundary Element Method) 이용한 수치해석 결과와 비교하였다. 탱크 벽면에서 측정된 수위와 압력은 내부재의 공극율과 설치 개수 및 배치 방법에 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 투과성 내부재 1개를 탱크 중앙 바닥 면에 설치한 경우 공진주기에서 수위와 압력이 크게 감소하였으나 내부재를 2개 이상 설치한 경우에 대한 슬로싱 억제 효과는 내부재 1개에 비하여 크지 않았다. 공극율이 작은 경우에는 탱크 내 유체의 고유주기가 불투과성 내부재를 설치한 경우에 대한 유체의 고유주기와 비슷하고 공극율이 특정 값을 넘어서면 내부재가 없는 순수한 탱크 내의 슬로싱 특성을 보였다. 내부재를 일정 깊이 잠기게 설치한 경우 내부재의 하부를 통하여 유체가 자유롭게 이동할 수 있으므로 공극율에 관계없이 내부재가 없는 순수한 탱크의 슬로싱 특성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 공극율이 약 0.1에서 0.2사이에 있는 투과성 내부재가 슬로싱 억제 성능이 가장 우수함을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 즉, 슬로싱 현상을 억제하는데 최적인 공극율이 존재함을 의미한다. 끝으로 모형실험을 통해 측정된 수위와 압력 결과는 수치해석 결과와 정성적으로 잘 일치하여 수치해석방법의 타당성을 검증할 수 있었다. 수치해석은 자유표면의 비선형 현상 탱크 내의 점성효과를 고려하지 못함으로 실험결과와 정량적인 값 차이는 존재한다. 그러나 위 결과들은 앞으로 슬로싱 저감을 위한 내부재 개발에 필요한 기초 자료를 제공하는데 도움을 줄 것으로 생각된다.

ABSTRACT

When the external forces (wave, wind) excite vehicles such as ship, airplane and cars, the fluid flow inside a tank can cause the instability or structural damage of vehicles. This phenomenon is called sloshing. In this thesis, the vertical porous baffles were used to reduce the sloshing in a rectangular tank. In order to investigate the sloshing reduction effect of vertical porous baffle, small-scaled model tests were conducted with two kinds of baffle (punched plate, slotted plate) for various values of porosity, installation position, and number of porous baffles. The experimental results were compared to the numerical results based on the boundary element method (BEM). The experimental results show that both the water elevation and pressure measured at tank wall are influenced greatly by the porosity, number, and position of porous baffles. When one porous baffle was installed with submergence depth equal to the bottom at the center of tank, the water elevation and pressure decrease at resonance period due to the energy dissipation effect across the porous baffle. An increase of the number of porous baffle does not improve the sloshing reduction than expected. In case of low value of porosity, the peaks appear at resonant periods like the impermeable baffle. When the porosity of porous baffle exceeds a specific value, the sloshing characteristics of the pure-tank appear as shown in experimental results. When the porous baffle was submerged at 5cm from the bottom, the water particles under the baffle can move back and forth freely so that the sloshing characteristics resemble the pure-tank regardless of the porosity. Especially, the experimental results indicate that the porous baffle with the porosity ranged from 0.1 to 0.2 can significantly reduce the violent resonant sloshing in a tank, that is, there exists optimal porosity suitable for sloshing reduction. Lastly, the experimental

results are in good agreement with numerical results using BEM. As the numerical solution can not consider not only the non-linear effect generated at free surface but also the viscous effect at the tank wall, the discrepancies between the experimental and numerical results are inevitable. In spite of these weaknesses, the numerical solutions will be used to supply the basic guideline for development of optimal baffle for the sloshing reduction in a tank.

제 1 장

서 론

1. 1 연구배경

액체 화물을 실은 운송체의 진동/운동은 탱크 내 유체의 운동을 유발하고 유체의 운동은 다시 탱크 내벽에 힘을 가해 운송체의 이동에 악영향을 미칠 수 있다. 이러한 액체 화물 탱크 내 유체 유동 현상을 슬로싱(Sloshing)이라 한다. 특히 조선공학 분야의 대표 운송 수단인 선박은 바람, 파도, 흐름 등의 외력을 항시 받기 때문에 슬로싱 현상은 끊임없이 생기게 되고 탱크 내부 벽면에 유체의 하중이 반복적으로 작용하여 구조적인 문제를 야기함과 동시에 선박의 운동에 영향을 주어 선박의 안정성을 위협하는 요소로 작용한다. 특히, 슬로싱 현상은 평상시에는 큰 문제가 되지 않지만 외부에서 받는 외력의 주파수와 탱크 내 유체의 고유주파수(Natural frequency)가 일치하는 조건을 만족하게 되면 공진현상(Resonance)이 발생하게 되어 탱크 내 유체의 운동은 급격히 커지게 되고 탱크 내부 벽면에 큰 충격력을 준다. 그 결과 탱크 벽면에 구조적인 변형이 일어나거나 장시간 영향을 받게 되는 경우 누적에 의한 피로파괴 등 심각한 문제점이 유발될 뿐만 아니라 선박의 평형유지에 악영향을 끼쳐 선박의 안전한 항해에 영향을 주게 된다.

슬로싱으로 생기는 피해를 줄이기 위한 다양한 방법들이 제안되고 이중에서 몇 가지는 실제로 현장에서 사용되고 있다. ① 탱크 내부를 구조적으로 보강을 하여 슬로싱에 의한 하중을 견디게 하는 방법, ② 탱크 내부에 추가적으로 불투과성 내부재(Baffle)를 설치하여 유체의 영역을 나눠 탱크 내 공진현상을 회피하는 방법, 나아가 ③ 탱크 내부에 투과성 내부재를 설치하여 유체가 구멍을 통과하면서 생기는 와류로 인해 에너지 손실을 유발하여 슬로싱 현상을

억제하는 방법(조일형, 2015), ④ 탱크 내부에 특수한 입자를 넣어 유체와 입자들의 상호작용을 통하여 슬로싱을 억제하는 방법, ⑤ 플로터(Floater)를 이용하여 탱크 벽면에 작용하는 충격을 완화시키는 방법(Hwang et al., 2010) 등 다양한 연구가 진행되고 새로운 방법들이 제안되고 있다. 현재 선박 내에서 발생하는 슬로싱 방지 기술은 프랑스에서 많은 특허를 가지고 있기 때문에 국내 조선 업계에서는 유체화물을 수송하는 특수한 선박을 건조할 때 막대한 로열티를 내고 있는 상황이다. 최근, 우리나라에서는 서울대학교 조선해양공학 연구팀이 대형 슬로싱 실험 인프라를 구축하여 슬로싱 실험에 대한 자체 기술을 보유할 수 있는 기반을 마련해 놓았다(김용환 등, 2012).

본 논문에서는 탱크 길이에 비해 상대적으로 폭이 좁은 2차원 사각 탱크가 수평방향(Sway)으로 일정한 주파수와 진폭을 가지고 운동을 하였을 때 탱크 내부에서 일어나는 슬로싱 현상을 줄이는 방법으로 내부재를 사용하였다. 탱크 내부에 설치하는 내부재는 탱크 내 유체의 고유주기를 변경하여 공진현상을 회피하는 기능을 수행한다. 본 논문에서는 일정한 공극율(Porosity)을 갖는 투과성 내부재를 사용하였다. 투과성 내부재는 일정한 크기의 원형 구멍과 슬릿(Slit)을 일정한 간격으로 배열한 형태(이후 타공판(Punched plate)과 슬릿판(Slotted plate)으로 칭함)로 뚫린 부분의 면적을 조절하여 원하는 공극율을 얻는다. 투과성 내부재의 기능은 공진현상을 회피함과 동시에 운동하는 탱크 내 유체가 내부재를 통과할 때 갑작스런 형태의 변화로 원형 구멍과 슬릿 주변에 강한 와류나 소용돌이가 형성되고 이러한 교란으로 탱크 내 유체가 지닌 에너지는 소멸되어 슬로싱을 억제한다. 특히 공진주기에서 발생하는 탱크 내 큰 수위를 줄이는데 효과적이다. 따라서 본 논문에서는 투과성 내부재의 여러 가지 중요한 설계변수에 따른 슬로싱 억제 효과를 확인하기 위하여 투과성 내부재의 종류, 공극율, 개수와 배치 및 탱크의 운동진폭과 주기를 바꿔가면서 모형실험을 수행하였다. 그리고 경계요소법을 이용한 수치해석 결과와 비교하여 해석 방법의 타당성을 확인하였다.

1.2 선행연구

1950~60년대 이후로 액체 연료를 사용하는 우주 로켓에서 발생하는 슬로싱 현상이 로켓의 구조 및 안정성에 문제를 일으킨다고 발표되어 이를 줄이는 목적으로 NASA 등에서 슬로싱에 대한 연구가 시작되었고 현재는 우주 로켓뿐만 아니라 다양한 분야에서 진행되고 있다. 특히, 조선공학 분야에서는 슬로싱에 의한 선박의 안정성 손실 및 구조적 결함에 의한 피해를 줄이기 위하여 슬로싱 억제 방법에 주로 초점을 두고 연구를 수행해왔다. 최근엔 해저석유 시추 외에 다양한 목적을(신재생에너지, 외해 양식시설 등) 가지고 설치되는 부유식 해상구조물에 관한 연구가 활발해지고 있으며 파랑 중 부유식 해상구조물의 운동을 줄이는 목적으로 슬로싱을 이용하는 연구도 수행되고 있다(하민호, 2013).

슬로싱 현상에 대한 명확한 규명을 위하여 많은 연구자들은 이론해석, 실험, 수치계산 등 다양한 방법으로 연구를 수행해왔다. 슬로싱 현상에 대한 해석은 대부분 선형이론에 국한되어 탱크 내 수위 변동이 미소 진폭인 경우에만 적용이 가능하다는 한계점을 지니고 있기 때문에 정량적인 값은 실제 값과는 차이를 보인다. 그러나 전반적인 공진현상을 포함한 슬로싱 현상을 쉽게 이해하는데 도움을 주기 때문에 많이 사용되고 있다. 실제로 비선형성을 고려한 슬로싱 해석도 부분적으로 이뤄지고 있지만(지영무 등, 2011) 정확도 향상 정도에 비하여 문제가 복잡하고 계산시간이 오래 걸리므로 주로 선형이론을 적용한 해석방법을 사용하고 모형실험을 통하여 얻은 결과를 가지고 부분적으로 보정하는 연구들이 수행되어져 왔다(Faltinsen, 1974).

탱크 내의 슬로싱 문제를 푸는 해법으로 선형포텐셜이론에 근거를 둔 고유함수전개법(MEEM, Matched Eigenfunction Expansion Method)을 사용하는 방법이 있다. 그러나 탱크 내 유체의 공진으로 인해 발생하는 슬로싱 현상으로 탱크 내 유체가 탱크 벽을 따라 높이 올라가는 현상과 탱크의 운동진폭이 큰 경우에 발생하는 탱크 내 비선형과 해석을 선형이론으로 해석하기에는 한계가 있기 때문에 수치해석을 통한 비선형 해석도 함께 연구되고 있다. 수치해석 방법으로 유한요소법(FEM, Finite Element Method), 경계요소법(BEM, Boundary

Element Method) 등 다양한 방법들이 있다(Ning et al., 2012). 이 밖에 점성의 영향을 고려한 CFD상용프로그램도 많이 사용되고 있다. CFD상용프로그램은 탱크 벽면에서 전단 응력에 의한 마찰력과 난류에 의한 에너지 소멸 효과 등 점성 감쇠 효과를 고려할 수 있지만 계산시간이 오래 걸리고 큰 메모리 용량을 요구한다는 측면에서 선행 연구들을 통하여 어느 정도 확정된 해석모델에 대한 정밀한 계산을 수행할 때 주로 이용된다. 현재 ANSYS사의 FLUENT(Wang et al., 2014)나 ableMax사의 ADINA-CFD(윤보현 등, 2010), ESI-OpenCFD사의 OpenFOAM 등 여러 프로그램이 사용되고 있다.

모형실험은 이론해석을 검증하는 목적으로 이용되며 또한 이론에서 취급하지 못한 중요한 현상들을 규명하는데 이용된다. 탱크의 불규칙한 운동에 의한 탱크 내 유체의 슬로싱 현상을 실험적으로 규명하기 위하여 다양한 계측 방법이 연구되고 있다. 탱크 벽에 작용하는 설계하중을 추정하기 위하여 탱크 벽에 압력게이지를 부착해서 압력을 직접 측정하거나 초음파 트랜스듀서를 이용하여 자성유체를 추적하는 UVP(Ultrasonic Velocity Profile) 기법을 이용한 측정 방법이 있다(Sawada et al., 1996; Ohira et al., 1999). 그리고 LDV(Laser Doppler Velocity) 기법(Saga et al., 1999) 및 탱크 내 유체와 섞인 미세한 알루미늄 입자를 추적하여 속도와 압력의 상관관계를 이용하여 측정하는 PIV(Particle Image Velocity)기법 등 슬로싱으로 인해 탱크에 작용되는 수위와 압력을 측정하는 다양한 방법들이 제시되어왔다(김광선 등, 2009; 김지웅 등, 2014; 양경규 등, 2014).

슬로싱은 탱크 내부에 유체가 부분적으로 채워진 상태에서 외력의 주기와 탱크 내 유체의 고유주기가 일치할 때 발생하는 공진으로 인해 특정 주기에서 특히 심하게 발생한다. 따라서 탱크 내부의 액체화물의 적재 용량과 탱크내의 고유주기는 서로 밀접한 관계가 있다. 탱크 내 적재용량에 따른 슬로싱에 대한 연구로 신장용 등은(2005) 선형포텐셜이론으로 가정하여 변분법을 이용하여 탱크 내 유체의 적재 용량과 탱크의 형상 및 내부재 설치에 따른 고유주기 산정식을 구하고 Lloyd 선급 고유주기 산정식 결과와의 비교를 통해 검증을 하였으며, 내부재 설치에 따른 슬로싱 고유주기 변화에 미치는 영향을 제시하였다.

슬로싱에 의한 피해를 줄이기 위하여 다양한 연구들이 수행되어왔다. ① 탱크의 내벽을 두껍게 제작하여 외부와 내부에서 받는 하중을 견디는 방법, ② 탱크 벽면에 작용하는 충격을 완화하는 방법(남정우 등, 2012), ③ 유체 내부에 부유물을 넣어 유체 흐름에 교란을 일으켜 발생하는 에너지 손실효과를 이용하는 방법, ④ 탱크 내부에 내부재를 설치하여 탱크내의 유체의 고유주기를 변경시켜서 공진을 회피하는 방법 등이 있다. 내부재는 크게 투과성 및 불투과성 내부재로 분류된다. 투과성 내부재의 경우 고유주기를 변경시키는 기능과 함께 유체가 내부재에 뚫린 원형 구멍과 슬릿을 통과하면서 생기는 와류로 인한 에너지 손실로 슬로싱 억제 효과를 기대할 수 있다. 이에 따라 내부재 공극율이 슬로싱에 미치는 영향에 대한 이론적, 실험적 연구가 수행되었다(곽영균 등, 2003; 박기진 등, 2003; 이홍우 등, 2005). Cho and Kim(2008)는 투과성 판의 공극율이 약 0.1일 때 투과성 판을 수직으로 설치할 때 보다 수면과 평행하게 일정 깊이 잠기게 설치하는 경우가 투과성 판을 통하여 소멸되는 에너지 손실효과가 가장 크게 나타남을 이론과 실험을 통해 밝히고 조파수조 내 설치되는 소파장치 개발에 적용하였다.

1.3 연구내용

슬로싱 현상은 외부에서 오는 외력의 주기와 탱크 내 유체의 고유주기가 일치하는 공진주기에서 탱크 내 수위가 크게 증폭하고 탱크 내벽에 큰 압력이 작용한다. 슬로싱으로 인해 탱크 벽면에 작용하는 수위와 압력을 억제하기 위해 본 논문에서는 사각 탱크 내부에 두께가 얇은 투과성 내부재를 설치하여 슬로싱에 미치는 영향을 실험적으로 살펴보고 모형실험 결과를 경계요소법을 이용한 수치해석 결과와 서로 비교하였다. 투과성 내부재는 동일한 크기의 원형 구멍과 슬릿을 일정한 간격으로 배열한 형태로 뚫린 부분의 면적과 간격을 조절하여 내부재 전체 면적과 뚫린 면적의 비로 공극율을 정하였다. 탱크 바깥쪽으로부터 외력이 작용하여 유체의 유동이 일어나고 투과성 내부재에 있는 원형 구멍과 슬릿을 통과하면서 생기는 강한 와류의 영향으로 에너지가

소멸된다. 투과성 내부재로 인한 탱크 내 수위가 줄어드는 효과를 확인하기 위하여 내부재의 여러 가지 중요한 설계변수를 바꿔가면서 체계적인 실험을 수행하였다.

모형실험은 마찰이 없는 LM가이드 위에 놓여진 사각 탱크와 구동모터 사이를 연결하는 연결봉을 설계 및 제작하여 사각 탱크가 횡 방향으로 일정한 운동진폭과 주기로 운동하도록 하였다. 투과성 내부재의 종류, 공극율, 설치 개수와 배치 방법 등을 바꿔가면서 탱크 벽면을 포함한 정해진 지점에서의 수위와 압력을 측정하였다. 측정된 수위는 탱크 운동진폭으로 나눈 무차원된 값으로 정의하는 증폭비를 산정하고 탱크 벽면에 작용하는 압력을 계산하여 모형실험 결과와 수치해석 결과를 비교하면서 내부재 설계변수에 따른 슬로싱 억제 효과를 확인하였다.

제 2장에서는 내부재를 포함한 사각 탱크 내 슬로싱 문제에 대한 경계치 문제를 구성하고 경계치 문제를 푸는 수치해석 방법인 경계요소법을 소개한 후 본 모델에 적용하여 수치해를 구하는 과정을 소개하였다.

제 3장에서는 모형실험에 관한 내용을 설명하였다. 먼저 모형실험에 사용되는 사각 탱크의 제원과 실험 장비의 기능 및 사용법을 설명하였다. 모형실험에서 탱크 내 수위 측정방법인 영상처리법과 탱크 벽면에서 압력을 측정하는 압력계를 소개하고 설치방법과 실험환경 전체 구성을 기술하였다. 끝으로 내부재의 종류, 공극율, 설치 개수와 배치 방법 및 탱크의 운동진폭과 주기를 선정하여 정리한 실험 방법을 소개하였다.

제 4장에서는 모형실험 결과 및 고찰 부분으로 실험조건을 따라 주요 설계변수들을 바꿔가면서 수행한 모형실험을 통해 측정한 탱크 벽면에서의 수위와 압력을 그래프로 나타내어 모형실험 결과를 분석하였다. 모형실험 결과와 수치해석 결과를 비교해서 수치해석 방법의 타당성을 검증하고 모형실험에서 다루지 않은 실험범위에 대하여 수치해석 결과의 도움을 참조하였다.

제 5장은 제 4장 실험결과 및 고찰에서 나타난 중요한 결과를 정리하여 본 논문의 결론을 제시하고 향후 계획을 기술하는 것으로 전체적인 논문을 구성하였다.

제 2 장

이론해석

2.1 문제의 정식화

탱크의 길이 $2a$, 수심 h 인 사각형 탱크의 중앙에 잠긴깊이 d 인 투과성 내부재가 놓여 있다고 생각하자(Fig. 2.1 참조). 탱크 내 유체는 비압축성, 비점성이며 비회전성 유동을 가정한다. 액체화물을 채운 사각형 탱크가 주파수 ω 를 가지고 수평방향으로 조화운동을 할 때 탱크 내 슬로싱 문제를 포텐셜 이론을 사용하여 살펴보았다. 속도포텐셜을 가지고 경계치 문제를 구성하면 아래와 같다.

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (2.1)$$

$$g \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \Phi_{xx} = 0, \quad \text{on } z = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad \text{on } z = -h \quad (2.3)$$

$$\Phi_x = \xi \omega \cos \omega t, \quad \text{on } x = \pm a \quad (2.4)$$

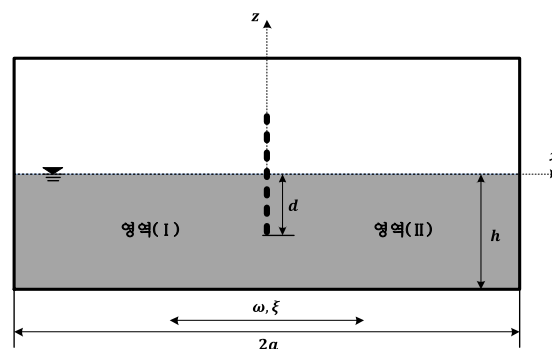


Fig. 2.1 Definition sketch of a rectangular tank with a porous baffle placed at center

여기서 ω 는 탱크의 운동 주파수이며, ξ 는 탱크의 운동진폭이다.

투과성 내부재가 $x=0$ 에 놓여 있다고 할 때 투과성 내부재에서의 정합조건식은 다음과 같다.

$$[\Phi_x]_{x=0^-}^{x=0^+} = 0 \quad \text{on } -h \leq z \leq 0 \quad (2.5)$$

$$\left[\frac{\partial \Phi(x, z, t)}{\partial t} \right]_{x=0^-}^{x=0^+} = \begin{cases} \frac{\alpha}{2} U(z, t) |U(z, t)| + 2C \frac{\partial U(z, t)}{\partial t} & -d \leq z \leq 0 \\ 0 & -h \leq z \leq -d \end{cases} \quad (2.6)$$

여기서 $U(z, t)$ 는 투과성 내부재에서의 상대유체속도로 유체속도에서 탱크의 운동속도를 뺀 값이다. α 와 C 은 각각 투과성 내부재를 통과하면서 발생하는 에너지 손실효과를 나타내는 항력계수(Drag coefficient)와 투과성 내부재 주변 유체에 부가된 관성력 효과를 나타내는 차단계수(Blockage coefficient)이다. Mei(1989)는 예연 오리피스(Sharp-edged orifice)의 단면수축계수 (Discharge coefficient) C_c 를 가지고 아래 식과 같이 항력계수 α 에 대한 식을 제시하였다.

$$\alpha = \left(\frac{1}{PC_c} - 1 \right)^2 \quad (2.7)$$

여기서 P 은 투과성 내부재의 공극율이다. 단면수축계수 C_c 에 대하여 Mei(1989)는 예연 오리피스를 가정하여 다음의 경험식을 사용하였다.

$$C_c = 0.6 + 0.4P^3 \quad (2.8)$$

속도포텐셜과 투과성 내부재에서의 상대유체속도를 시간과 공간 함수로 분리하면

$$\begin{aligned} \Phi(x, z, t) &= \text{Re} \{ \omega \xi \phi(x, z) e^{-i\omega t} \} \\ U(z, t) &= \text{Re} \{ \omega \xi u(z) e^{-i\omega t} \} \end{aligned} \quad (2.9)$$

이다. 속도포텐셜(ϕ)에 대한 경계치 문제를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - K\phi = 0, \quad \left(K = \frac{\omega^2}{g} \right), \quad \text{on } z = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad \text{on } z = -h \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 1, \quad \text{on } x = \pm a, \quad -h \leq z \leq 0 \quad (2.13)$$

두 번째 정합조건식인 식 (2.6)안에 속도 제곱에 비례하는 비선형 항으로 인해 입력 주파수 ω 에 대해 여러 개의 주파수 성분($\omega, 2\omega, 3\omega, \dots$)들이 생성된다. 따라서 속도포텐셜을 주파수 ω 의 배수로 나타내는 Fourier 급수식으로 표현하고 첫 번째항인 ω 성분만을 취하고 나머지 항은 작다고 가정하여 무시한다. 이때 첫 번째 항의 Fourier계수는 $8/3\pi$ 이다. 이러한 등가선형화(Equivalent linearization) 과정을 통하여 식 (2.5)와 (2.6)을 다시 쓰면 다음과 같다. 이때 관성항은 작다고 무시하였다.

$$[\phi_x(x, z)]_{x=0^-}^{x=0^+} = 0, \quad -h \leq z \leq 0 \quad (2.14)$$

$$[\phi(x, z)]_{x=0^-}^{x=0^+} = \begin{cases} \frac{i\beta}{\omega} [\phi_x(0, z) - 1] & -d \leq z \leq 0 \\ 0 & -h \leq z \leq -d \end{cases} \quad (2.15)$$

여기서 $\beta = \frac{4\alpha\xi\omega}{3\pi} \|\phi_x(0, z) - 1\|$ 이다.

2.2 경계요소법

본 논문에서는 탱크와 내부재의 임의의 형상에 대한 슬로싱 문제를 다루기 위한 수치해석기법으로 경계요소법을 사용하였다. Green 정리를 사용하여 유체 내부영역을 둘러싼 전 경계면을 N 개의 요소들로 나누고 각 요소에서 속도포텐셜과 법선방향의 속도가 일정하다고 가정하면 아래와 같은 이산화된 경계적분방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{1}{2}(\phi_i) + \sum_{j=1}^N (\phi_j) \int_{\Gamma_j} \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma = \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial \phi_j}{\partial n} \right) \int_{\Gamma_j} G d\Gamma \quad (2.16)$$

여기서 G 는 Laplace 방정식 $\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} = -\delta(x-\xi)\delta(y-\eta)$ 를 만족하는 기본해 (Fundamental solution)로 로그 함수로 식 (2.17)과 같이 표현된다.

$$G(x, y; \xi, \eta) = -\frac{1}{2\pi} \ln(r), \quad r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2} \quad (2.17)$$

여기서 (ξ, η) 는 특이점(Source point) 의 위치이다.

식 (2.16)에서 적분항들이 아래 식 (2.18)과 같이 정의된다면 식 (2.16)의 적분방정식은 식 (2.19)과 같은 대수방정식으로 표시할 수 있다.

$$\hat{H}_{ij} = \int_{\Gamma_j} \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma, \quad G_{ij} = \int_{\Gamma_j} G d\Gamma \quad (2.18)$$

여기서 $H_{ij} = \begin{cases} \hat{H}_{ij} & i \neq j \\ \hat{H}_{ij} + \frac{1}{2} & i = j \end{cases}$ 이다.

$$\sum_{j=1}^N H_{ij} \phi_j = \sum_{j=1}^N G_{ij} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \quad (2.19)$$

여기서 $\sum_{j=1}^N = \sum_j^{N_F} + \sum_j^{N_W} + \sum_j^{N_B} + \sum_j^{N_X} + \sum_j^{N_P}$ 이다. N_F, N_W, N_B, N_P, N_X 는 탱크 내 유체영역을 둘러싼 각 경계면에 대한 요소의 개수로 순서대로 자유표면, 벽, 바닥, 정합면, 내부재 경계면을 뜻한다. 유체영역을 투과성 내부재를 기준으로 편의상 영역 (I)과 영역 (II)로 나누고 첨자 1, 2로 구분한다.

Fig. 2.2 와 같이 영역 (I)을 둘러싼 경계면을 L 개의 요소로 나누고 영역 (II)을 둘러싼 경계면을 M 개의 요소로 분할하여 각 경계면에서 적용되는 경계조건식(2.10 - 2.15)들을 적용한다.

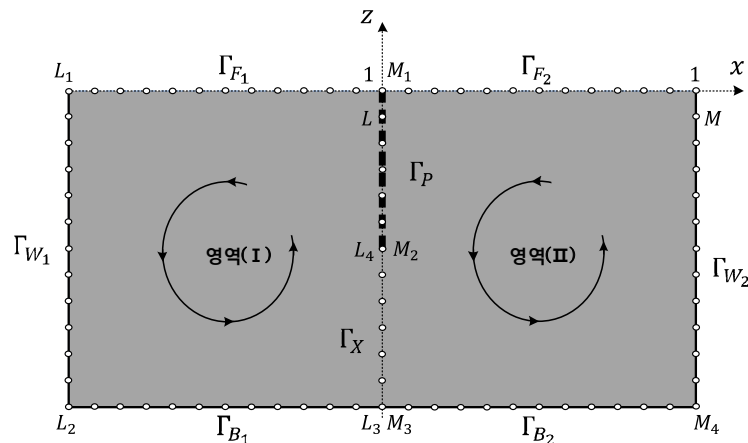


Fig. 2.2 Definition sketch of boundaries and elements

정합면 $\Gamma_X(x=0, -h \leq z \leq -d)$ 에서 압력과 법선방향 속도는 서로 같다는 정합 조건식(식 (2.14), (2.15))을 적용한다.

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial n} = \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n} = -\frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial n} \\ \bar{\phi} = \phi^{(1)} = \phi^{(2)} \end{cases} \quad (2.20)$$

여기서 윗첨자 $\bar{}$ 는 정합면에서 새롭게 정의된 값을 의미한다.

투과성 내부제가 위치한 $\Gamma_p(x=0, -d \leq z \leq 0)$ 에서 법선방향 속도는 서로 같아야 하며 $\left(\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n} = -\frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial n}\right)$ 투과성 경계조건식인 식 (2.15)을 만족하여야 한다.

$$\phi^{(2)} - \phi^{(1)} = \frac{i\beta}{\omega} \left(\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n} - 1 \right) \quad (2.21)$$

여기서 $\beta = \frac{4\alpha\xi\omega}{3\pi} \left\| \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n} - 1 \right\|$ 이다.

영역 (I)에 속한 경계면에서의 경계조건식들과 두 영역이 만나는 정합면에서의 정합조건식을 대입하여 영역 (I)에 대한 대수 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \sum_j^{N_{F_1}} \left(H_{ij} - \frac{\omega^2}{g} G_{ij} \right) \phi_j^{(1)} + \sum_j^{N_{W_1}} H_{ij} \phi_j^{(1)} + \sum_j^{N_{B_1}} H_{ij} \phi_j^{(1)} + \sum_j^{N_X} H_{ij} \bar{\phi}_j \\ & + \sum_j^{N_P} \left(H_{ij} - i\omega \frac{G_{ij}}{\beta_j} \right) \phi_j^{(1)} + \sum_j^{N_P} i\omega \frac{G_{ij}}{\beta_j} \phi_j^{(2)} - \sum_j^{N_X} G_{ij} \frac{\partial \bar{\phi}_j}{\partial n} = -\sum_j^{N_{W_1}} G_{ij} + \sum_j^{N_P} G_{ij} \end{aligned} \quad (2.22)$$

같은 방법으로 영역 (II)에 속한 경계조건식인 자유표면, 벽, 바닥, 투과성 내부제에서의 경계조건식들과 정합조건식을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \sum_j^{N_X} H_{ij} \bar{\phi}_j + \sum_j^{N_P} i\omega \frac{G_{ij}}{\beta_j} \phi_j^{(1)} + \sum_j^{N_{F_2}} \left(H_{ij} - \frac{\omega^2}{g} G_{ij} \right) \phi_j^{(2)} + \sum_j^{N_P} \left(H_{ij} - i\omega \frac{G_{ij}}{\beta_j} \right) \phi_j^{(2)} \\ & + \sum_j^{N_X} G_{ij} \frac{\partial \bar{\phi}_j}{\partial n} + \sum_j^{N_{B_2}} H_{ij} \phi_j^{(2)} + \sum_j^{N_{W_2}} H_{ij} \phi_j^{(2)} = -\sum_j^{N_P} G_{ij} + \sum_j^{N_{W_2}} G_{ij} \end{aligned} \quad (2.23)$$

여기서 $\beta = \frac{4\alpha\xi\omega}{3\pi} \left\| \frac{\partial \phi_j^{(1)}}{\partial n} - 1 \right\|$ 이다.

비선형 대수방정식인 식 (2.22)와 식 (2.23)을 행렬식으로 바꾸어 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
& \left([H] - \frac{\omega^2}{g} [G] \right) [\phi^{(1)}]_{j=1, \dots, L_1}^{(k)} + [H] [\phi^{(1)}]_{j=L_4, \dots, L_3}^{(k)} + [H] [\bar{\phi}]_{j=L_3, \dots, L_4}^{(k)} \\
& + \left([H] - i\omega \frac{[G]}{[\beta]^{(k-3/2)}} \right) [\phi^{(1)}]_{j=L_4, \dots, L}^{(k)} + i\omega \frac{[G]}{[\beta]^{(k-3/2)}} [\phi^{(2)}]_{j=M_2, \dots, M_1}^{(k)} \\
& - [G] \left(\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial n} \right)_{=M_3, \dots, M_2}^{(k)} = -[G]_{j=L_4, \dots, L_2} + [G]_{j=L_4, \dots, L}, \quad i = 1, \dots, L
\end{aligned} \tag{2.24}$$

$$\begin{aligned}
& [H] [\bar{\phi}]_{j=L_4, \dots, L_3}^{(k)} + i\omega \frac{[G]}{[\beta]^{(k-3/2)}} [\phi^{(1)}]_{j=L, \dots, L_4}^{(k)} + \left([H] - \frac{\omega^2}{g} [G] \right) [\phi^{(2)}]_{j=1, \dots, M_1}^{(k)} \\
& + \left([H] - i\omega \frac{[G]}{[\beta]^{(k-3/2)}} \right) [\phi^{(2)}]_{j=M_1, \dots, M_2}^{(k)} + [G] \left(\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial n} \right)_{=M_2, \dots, M_3}^{(k)} \\
& + [H] [\phi^{(2)}]_{j=M_3, \dots, M}^{(k)} = -[G]_{j=M_1, \dots, M_2} + [G]_{j=M_4, \dots, M}, \quad i = 1, \dots, M
\end{aligned} \tag{2.25}$$

여기서 $[\beta]^{(k-3/2)} = \frac{4\alpha\xi\omega}{3\pi} \left\| \left[\frac{\partial \phi_j^{(1)}}{\partial n} \right]^{(k-3/2)} - 1 \right\|$ 이다.

위에 주어진 비선형 방정식을 풀기 위하여 본 논문에서는 축차법(iteration method)을 사용하였다. (k) 번째 반복 단계(iteration step)에서의 미지수 $[\phi^{(1)}], [\phi^{(2)}]$ 을 얻기 위해서는 같은 반복 단계에서의 $[\beta]^{(k)}$ 를 알아야 한다. 그러나 $[\beta]^{(k)}$ 는 현 반복 단계의 해를 알아야 정의된다. 따라서 $[\beta]^{(k)}$ 대신에 이전의 반복 단계 $[\beta]^{(k-3/2)}$ 에서의 값을 사용한다. 여기서 윗첨자 ($k-3/2$)는 반복 단계 ($k-1$)와 반복 단계 ($k-2$)에서의 값의 평균값을 의미한다. 이러한 방법으로 각 반복 단계에서 해 $\left([\phi^{(1)}]^{(k)}, [\phi^{(2)}]^{(k)} \right)$ 를 구하는데, 오차범위 $|\phi^{(k+1)} - \phi^{(k)}| \leq 10^{-6}$ 을

만족할 때까지 계산을 반복한다. 이때 초기값으로 $[\beta]^{(1)} = -\frac{4\alpha\xi\omega}{3\pi}$ 을 사용하였다.

각 분할 요소에서 속도포텐셜 값을 가지고 탱크의 수평운동에 의한 x 방향의 동유체력 ($F_x = \text{Re}\{f_x e^{-i\alpha t}\}$) 을 탱크 벽과 내부재에서의 속도포텐셜을 적분하여 구할 수 있다.

$$f_x = \rho\omega^2\xi \left\{ \int_{-h}^0 [\phi^{(2)}(-a, z) - \phi^{(1)}(a, z)] dz + \int_{-d}^0 [\phi^{(1)}(0, z) - \phi^{(2)}(0, z)] dz \right\} \quad (2.26)$$

동유체력 f_x 를 실수부와 허수부로 나누면 다음과 같다.

$$f_x = (\omega^2\mu + i\omega\nu)\xi \quad (2.27)$$

여기서 μ 는 부가질량이며, ν 는 감쇠계수이다.

탱크 내의 수면변위 ($\zeta(x, t) = \text{Re}\{\eta(x)e^{-i\alpha t}\}$) 는 속도포텐셜을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta_j = \frac{\omega^2\xi}{g}\phi_j, \quad j = 1, \dots, N_F \quad (2.28)$$

탱크벽에서의 동압력은 ($P(z, t) = \text{Re}\{p(z)e^{-i\alpha t}\}$) 는 속도포텐셜을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_j = i\rho\omega^2\xi\phi_j - \rho g\eta, \quad j = L_1, \dots, L_2, L_7, \dots, N \quad (2.29)$$

제 3 장

모형실험

3.1 실험장비

3.1.1 탱크 구동장치

본 논문에서는 구동장치를 사용하여 사각 탱크를 수평방향으로 일정한 주기와 진폭으로 운동하도록 하였다. 사각 탱크를 구동시키기에 적합한 모터의 용량을 선정해야 한다. 사각 탱크 내에 유체가 10cm깊이로 채워져 있는 상태에서 탱크의 운동진폭을 0.5cm라 가정하여 구한 모터의 토크(Torque)는 $36.79 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ 이다. 본 실험에서 모터는 탱크를 수평방향으로 마찰이 적은 LM 가이드 위에서 구동시키기 때문에 위에 계산된 결과 보다 훨씬 작은 토크 값으로도 충분히 구동이 가능하다.

탱크의 운동주기 변화에 따른 탱크 내 슬로싱 현상을 살펴보기 위하여 운동주기를 변화시키면서 모형실험을 수행할 수 있도록 모터의 회전 수(RPM)를 자유롭게 변경할 수 있도록 하였다. 탱크의 크기와 유체가 채워지는 깊이에 따라 변하는 탱크 내 유체의 고유주기를 산정하는 식은 아래와 같다(신장룡 등, 2005).

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{gn\pi}{2a} \tanh\left(\frac{n\pi h}{2a}\right)}}, \quad n=1,2,3,\dots \quad (3.1)$$

식 (3.1)을 이용하여 순수한 탱크 내 1차, 2차, 3차 고유주기는 각각 1.07초, 0.61초, 0.47초이다. 따라서 위 3차까지의 고유주기를 모두 포함하고 주기 변화에 따른 전체적인 경향을 파악하기 위하여 탱크의 운동주기의 범위를 약 0.25초부터

1.4초까지 정하였다. 이를 RPM으로 환산하면 $42\text{rev}/\text{min}$ 에서 $240\text{rev}/\text{min}$ 이다.

탱크 운동시작부터 미리 설정된 RPM 값으로 모터가 구동하게 되면 탱크 내 유체는 갑자기 움직이게 되어 비선형적인 유동 특성을 보이는 천이 시간 영역이 나타나고 유체 유동이 정상상태에 도달하는데 많은 시간이 걸린다. 따라서 이를 방지하기 위하여 시작부터 5초까지 순차적으로 모터의 RPM을 가속하여 설정된 RPM에 도달하도록 한다. 원하는 데이터를 모두 얻으면 모터를 5초간의 시간 동안 천천히 감속하여 정지시킨다. 이상의 모터 특성들을 고려하여 본 실험에서는 YASKAWA사의 SGMJV-04ADL21 모터를 선정하였다.

모터를 브래킷(Bracket)과 결합시켜 모터의 설치를 용이하게 하였다. 또한 사각 탱크의 운동진폭을 쉽게 조절할 수 있도록 직경 15cm인 원판(Disk) 가운데에 일자로 홈을 내어 설정된 진폭에 맞는 위치에 연결봉의 한 끝을 고정하고 다른 한 끝을 탱크에 연결한다. Fig. 3.1 은 구동장치의 제작 도면과 조립품을 보여주고 있다.

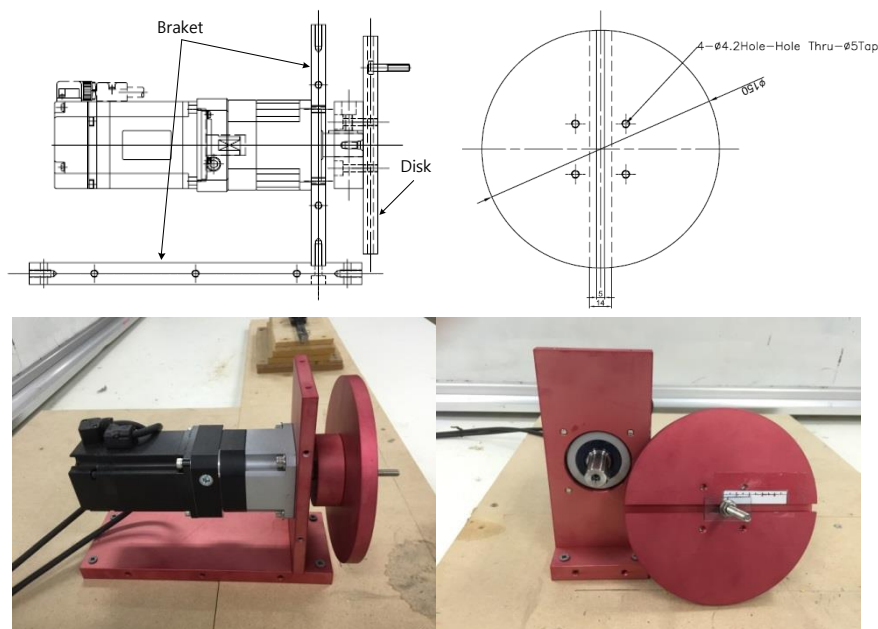


Fig. 3.1 Design sheet and experimental model of device for actuating the rectangular tank

3.1.2 탱크 모형

모형실험에 사용한 사각 탱크는 길이 50cm, 높이 50cm, 폭 10cm이다. 탱크 내 유동의 변화를 밖에서 확인할 수 있도록 투명한 아크릴로 제작하였다. 실험 중 슬로싱 현상으로 인한 유체 유동이 탱크 벽면에 가해지는 압력으로 인해 탱크가 변형되지 않도록 탱크의 두께를(1.2cm) 정하고 실험하는 동안 탱크 내 유체가 밖으로 새지 않도록 바닥 면을 이중으로 보강하였다. 내부재를 설치하는 위치에 0.4cm 두께의 홈을 내어 내부재를 쉽게 끼워 고정할 수 있도록 하였다.

탱크가 수평방향으로 움직이는 동안 마찰을 줄이기 위하여 탱크 바닥 면에 LM 가이드를 결합하고 테이블 바닥 면에 단단히 고정시켰다. 모터가 작동함에 따라 탱크가 LM 가이드를 따라서 움직이도록 회전하는 원판과 탱크 사이에 연결봉을 설치하였다. 실험에 사용된 탱크 모형을 Fig. 3.2 에 제시하였다.

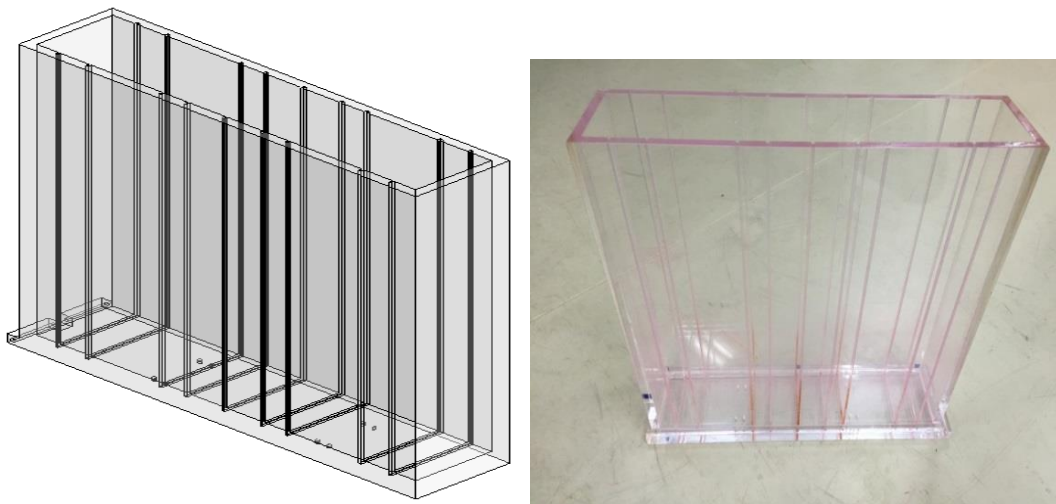


Fig. 3.2 3-D sketch and photograph of a rectangular tank model

3.1.3 내부재

내부재는 탱크 내부에 설치되는 슬로싱 억제 장치로 2가지 목적으로 사용된다. 먼저 탱크 내 유체 영역을 나눠 유체의 고유주기를 변경시켜 공진을 회피한다. 또 다른 목적은 탱크 내 유체가 투과성 내부재의 원형 구멍이나 슬릿을 통과하면서 발생하는 와류로 인한 에너지 손실효과로 슬로싱을 억제시키는 것이다. 이러한 내부재의 억제 효과는 특히 공진주기에서 크게 증폭된 수위를 줄이는데 효과적이다.

모형실험에 사용한 타공판을 확대해 보면 Fig. 3.3 왼쪽 그림과 같이 직경이 d 인 동일한 크기의 원형 구멍이 일정한 간격으로 (l) 배열된 형태이며 인접한 세 개의 원형 구멍은 정삼각형을 이룬다. 따라서 정삼각형 내 뚫린 부분의 면적은 원형 구멍 면적의 1/2 이며 이 면적을 정삼각형의 면적으로 나누면 내부재 전체 면적에서 뚫린 면적의 비로 표현되는 공극율을 구할 수 있다. 모형실험에 사용한 타공판의 공극율은 0.0567, 0.0816, 0.1275, 0.2267, 0.3265로 총 5가지이다. 슬릿판은 Fig. 3.3 오른쪽 그림과 같이 슬릿의 폭은 (w) 탱크의 폭과 같고 높이는 d 이며 일정한 간격으로 (l) 배치된 형태이다. 슬릿의 폭이 탱크의 폭과 같기 때문에 슬릿과 슬릿 사이의 간격을 조절하여 공극율을 결정한다. 모형실험에 사용한 슬릿판의 공극율은 0.0964, 0.1968, 0.3022 로 총 3가지이다. 제작된 타공판과 슬릿판을 Fig. 3.4 에 나타내었고 내부재의 제원을 Table 3.1 에 제시하였다.

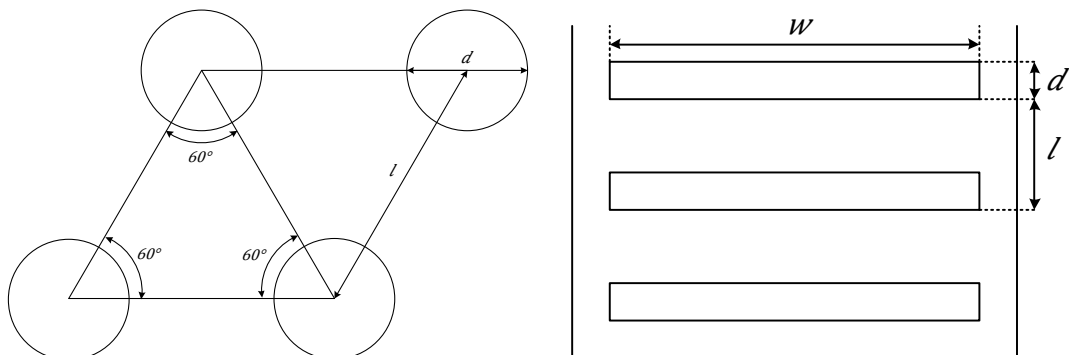


Fig. 3.3 Detailed sheet of punched plate (left) and slotted plate (right)

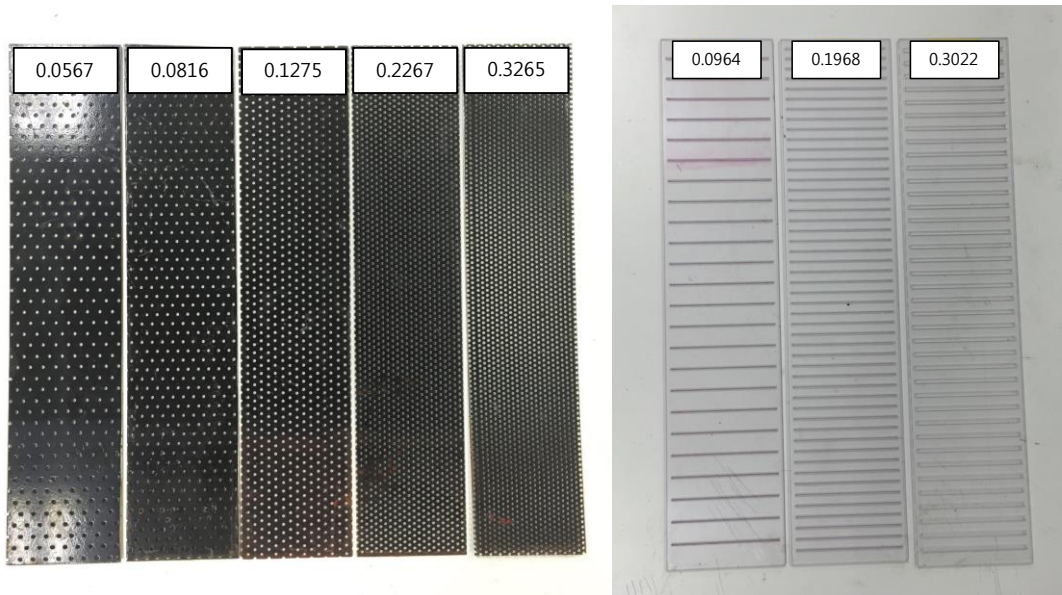


Fig. 3.4 Experiment model of the punched plate (left) and slotted plate (right)

Table 3.1 Specification of porous baffles used in the sloshing test

Type	Porosity	Diameter of Hole	Spacing of Adjacent Holes
		Height of Slit	Spacing of Adjacent Slits
Punched Plate	P=0.0567	3mm	5mm
	P=0.0816		6mm
	P=0.1275		8mm
	P=0.2267		10mm
	P=0.3265		12mm
Slotted Plate	P=0.0964	2mm	20mm
	P=0.1968		10mm
	P=0.3022		13mm

3.1.4 측정 장비

슬로싱 현상에 의해 생기는 탱크 내 수위 변화를 측정하는 방법으로 본 논문에서는 실험 동영상을 분석해 결과를 얻는 영상처리기법(Image processing)을 사용하였다. 영상처리기법을 통해 측정되는 수위 변화는 동영상 촬영장비의 해상도(Resolution)가 높을수록 화면을 차지하는 픽셀(Pixel) 수가 많아져 정밀한 측정이 가능해지고, 촬영장비의 연사 속도(FPS, Frame Per Second)가 빠를수록 순간적으로 일어나는 현상을 포착할 수 있다. 그러나 정확도를 높이려는 목적으로 높은 사양으로 동영상 촬영을 하게 되면 많은 수의 픽셀과 처리해야 할 프레임(Frame) 수가 증가하므로 계산 양이 많아지는 단점이 있다. 따라서 정확도와 계산 시간의 상관관계를 고려한 적절한 장비 설정이 필요하다.

촬영장비에 사용되는 렌즈 중 광각렌즈(Wide-angle lens)는 짧은 초점거리의 영향을 받아 형상이 왜곡되는 효과가 생기며 렌즈에서 멀어 질수록 왜곡 현상은 더 심해진다. 따라서 광각렌즈를 사용해서 수위 변화를 얻기 위해서는 왜곡된 공간을 평면으로 만드는 보정 작업을 거쳐야 한다. 본 실험에서는 실제 눈에 보이는 것과 같이 왜곡 효과가 적고 평면에 가까운 영상을 주는 표준렌즈(Normal lens)를 사용하였다.

영상처리기법을 사용하기 위해서는 동영상의 확장자(Filename extension)와 소프트웨어와의 호환성을 고려하여야 한다. 본 논문에 사용된 소프트웨어는 Matlab2013으로 확장자가 mp4와 mov인 동영상을 분석할 수 있도록 지원해준다. 동영상 정보의 형태나 형식을 변환하는 인코딩(Encoding)을 이용하여 다른 확장자로 구성된 동영상도 분석 가능하지만 변환과정에서 왜곡이 생길 수 있다. 따라서 촬영된 동영상의 확장자가 mp4나 mov로 저장되는 장비를 사용하였다. 이상에서 제시한 조건들을 고려해서 촬영장비로 iPhone6에 내장된 캠코더 기능을 사용하였다.

영상처리기법을 통해 탱크 내 수위를 측정하기 위하여 탱크 하단 모서리에 일정한 간격을 두어 정사각형 모양의 파란색 표시지 2개를 붙였다. 탱크 내 수위 추적을 용이하게 하기 위하여 탱크에 빨간색 물감을 섞은 물을 넣었다. 탱크 내

수위 변동을 측정하는데 사용되는 영상추적법(Image tracking)은 Matlab2013 프로그램에서 RGB색상(빨강, 초록, 파랑)만 인식할 수 있는 명령어를 통해 만들어진 영상처리기법이다. 영상에서 검출된 픽셀 정보를 길이로 환산하기 위하여 픽셀과 길이 사이의 관계를 알아야 한다. 탱크 하단에 붙인 2개의 파란색 표시지는 둘 사이의 관계를 제공함과 동시에 탱크의 운동을 측정하는데 도움을 준다. 두 파란색 표시지 간의 거리는 24cm이다.

슬로싱 현상으로 탱크 벽에 작용하는 유체의 압력을 측정하기 위하여 엠텍(MTEC)사의 초소형 방수용 압력계인 P310-02S를 사용하였다. P310-02S는 크기가 작아서 작은 실험 모형에도 설치하기 용이하다. 스테인리스(SUS) 재질로 제작되어 부식에 강하고 완전 방수가 되므로 물속에서 장기간 측정이 가능하다.

압력계에서 측정된 신호는 약하기 때문에 증폭기(Amplifier)를 거쳐서 증폭된 신호를 처리한다. 압력계로 정확한 측정값을 얻기 위하여 먼저 잠긴 깊이에 따라 측정되는 전압과 정수압의 상관관계를 1차 함수로 가정하여 기울기를 구하는 보정작업(Calibration)을 수행한다. 보정작업을 통해 Fig. 3.5 를 얻을 수 있고 그래프를 통해 증폭기의 이득(Gain)은 직선의 기울기에 해당하는 -2311.8이라는 것을 알 수 있다. 보정작업을 통해 구한 이득을 이용하여 압력을 측정한다.

압력계를 수면에 가깝게 설치할 경우 모형실험 중 탱크 벽면을 따라 유체가 내려가게 되면 공기에 노출되는 경우가 생기기 때문에 탱크벽면에서의 압력을 정확하게 측정하기 힘들다. 따라서 압력계를 탱크 바닥으로부터 2cm 떨어진 벽면에 설치하여 실험하는 동안 공기 중에 노출되는 것을 방지하였다. 모형실험에 사용한 압력계는 Fig. 3.6 에 제시하였다.

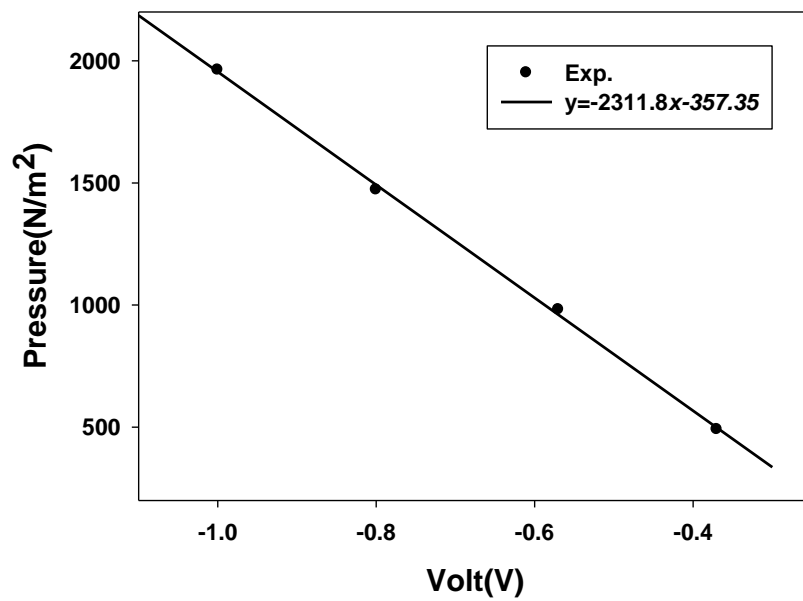


Fig. 3.5 Relation between the voltage and pressure

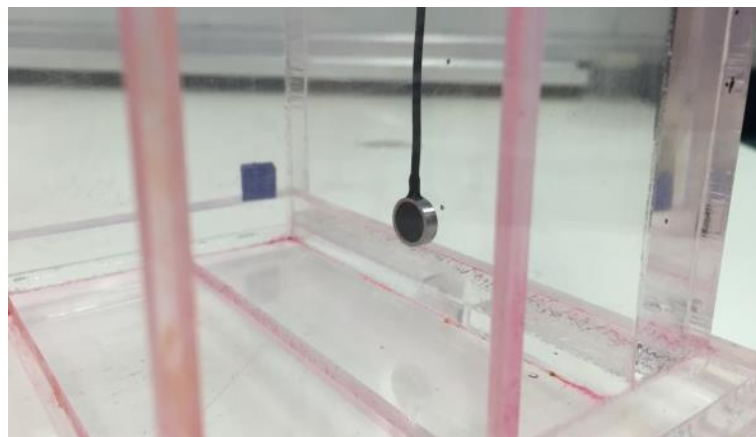


Fig. 3.6 Installation photograph of the pressure gauge on tank wall

3.2 실험방법

탱크 내 수위 측정 지점은 좌측 벽면과 벽면에서 10cm 떨어진 지점이다. Fig. 3.7 은 영상추적법을 이용하여 측정지점에서의 수위를 검출하고 실험영상 위에 나타낸 그림이다. 탱크 하단에 있는 두 파란 표시지를 차지하는 픽셀 수와

표시지 사이의 거리에 대한 상관관계를 고려하여 한 픽셀의 길이가 약 0.03cm로 계산되었다. 영상추적법으로 색깔을 검출해서 처리하는 과정을 확인할 수 있도록 측정 지점에서의 수위는 파란색 점으로 표시하고 파란색 표시지 2개를 빨간색 사각형 테두리로 표시하도록 하였다. 영상처리를 통해 수위를 측정하는 과정에서 길이단위로 환산된 수위를 실시간으로 확인할 수 있도록 측정 점 하단에 수위 값을 출력하도록 하였다. 압력신호는 초당 100개의 신호를 받았으며 측정데이터 중 안정한 상태에 도달한 부분만을 추출하였다.

Fig. 3.8 은 탱크의 운동진폭이 0.3cm, 주기가 0.6초인 실험에 대하여 앞에서 소개한 측정 장비를 통해 얻은 시계열 자료를 나타낸 그림이다. 순서대로 탱크의 운동변위, 탱크 벽면에서의 수위 및 압력을 나타낸다. 탱크 내 수위를 측정하는 영상추적법을 검증하기 위하여 앞에서 설정한 탱크 운동조건과 탱크의 운동 변위 그래프를 분석한 결과를 비교하였다. 그래프를 통해 탱크의 운동변위가 약 0.292cm, 주기가 약 0.599초로 측정되었다. 실험조건과 측정값의 오차율이 약 3% 이내로 확인되기 때문에 영상추적법을 이용한 수위 측정이 가능하다고 판단하였다. 이 자료를 이용하여 수위의 최댓값과 최솟값의 차에 대한 평균값을 탱크 운동진폭의 2배로 나눈 값을 증폭비 (R_a) 로 정의하고 압력의 최댓값과 최솟값의 차이에 대한 평균값을 P_m 으로 정의하였다.



Fig. 3.7 Snapshot of the Image tracking for measuring water elevation and tank motion

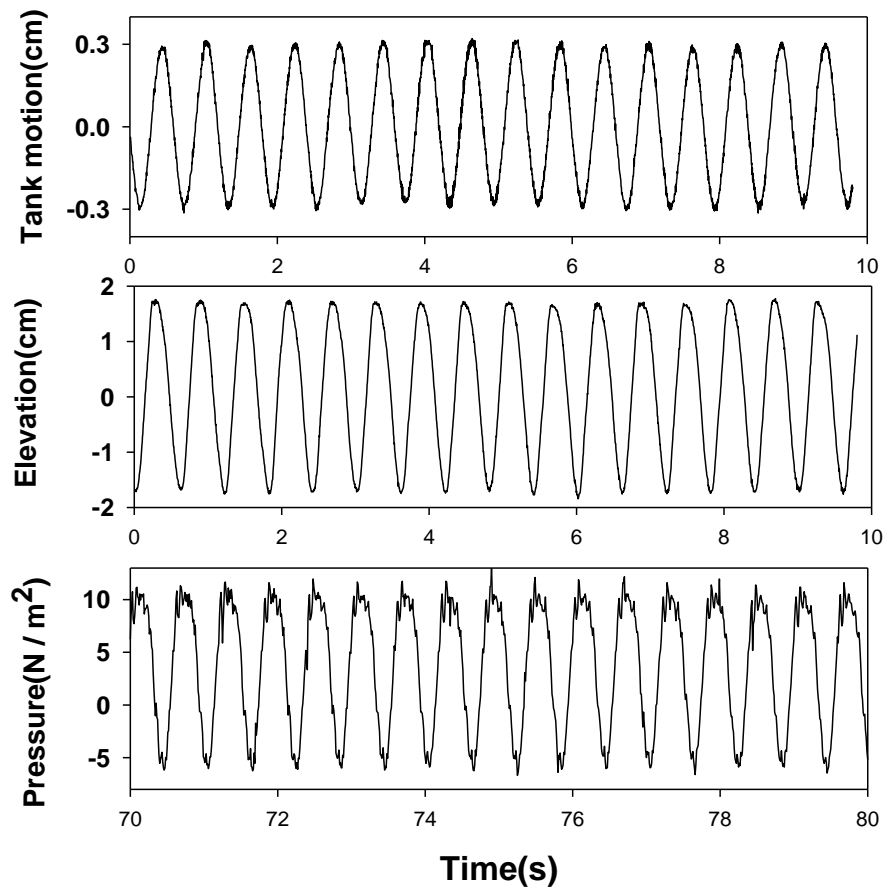


Fig. 3.8 Time series of the tank's sway motion, wave elevation and pressure (amplitude: 0.3cm, period: 0.6s)

모형실험은 먼저 ①내부재가 없는 순수한 탱크 내 수위와 벽면에 작용하는 압력을 측정하였다. 이후 내부재의 종류와 공극율을 달리하면서 ②투과성 내부재 1개를 탱크의 중앙에 바닥까지 잠기게 설치한 것과 수심의 중간지점까지 잠기게 설치한 경우에 대하여 실험을 수행하였다. ③탱크 중앙으로부터 좌우로 8.3cm떨어진 지점에 내부재를 각각 설치해 같은 실험을 반복하였다. ④ 중앙으로부터 좌우로 8.3cm와 18cm떨어진 지점에 내부재를 각각 2개씩 배치하여 총 4개의 내부재에 대한 실험을 수행하였다. 이때 중앙에 가까운 위치에 배치된 내부재와 바깥쪽에 배치된 내부재는 같은 공극율을 갖는 내부재를 사용하였다. 공극율은 0.1275와 0.2267 2종류를 선정하였다. 먼저 바깥쪽에 배치된 내부재의 공극율을 0.1275로 하고 중앙부에 배치된 내부재의 공극율을 0.2267로 하여

실험을 하고 이후 내부재의 위치를 바꿔 동일한 실험을 수행하였다. 마지막으로 ⑤공극율을 0.1275로 고정하고 탱크의 운동진폭(0.1, 0.2, 0.3, 0.4cm)을 변경하면서 동일한 실험을 실시하였다. Fig. 3.9 는 실험환경에 대한 전체적인 구성을 나타내고 모형실험 조건을 Table 3.2 에 나타내었다. Fig. 3.10 는 실험 조건을 간략하게 도식화하였다.

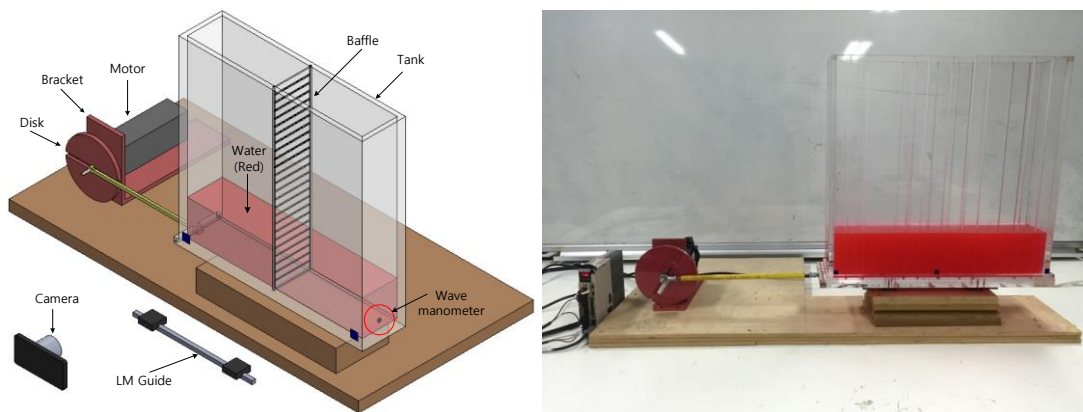


Fig. 3.9 3D sketch and snapshot of experimental set-up

Table 3.2 Experimental conditions in model tests

	Exp.#1	Exp.#2	Exp.#3	Exp.#4
Number of Baffles	0	1	2	4
Position of Baffles	-	$x = 0$	$x = \pm 8.3\text{cm}$	$x = \pm 8.3\text{cm}, \pm 18\text{cm}$
Submergence Depth of Baffles		5cm, 10cm		
Punched Plate Porosity	0.0567 / 0.0816 / 0.1275 / 0.2267 / 0.3265			
Slotted Plate Porosity	0.0964 / 0.1968 / 0.3022			
Sway Motion Period	0.2 - 1.4 sec			
Sway Motion Amplitudes	0.1cm - 0.4cm			

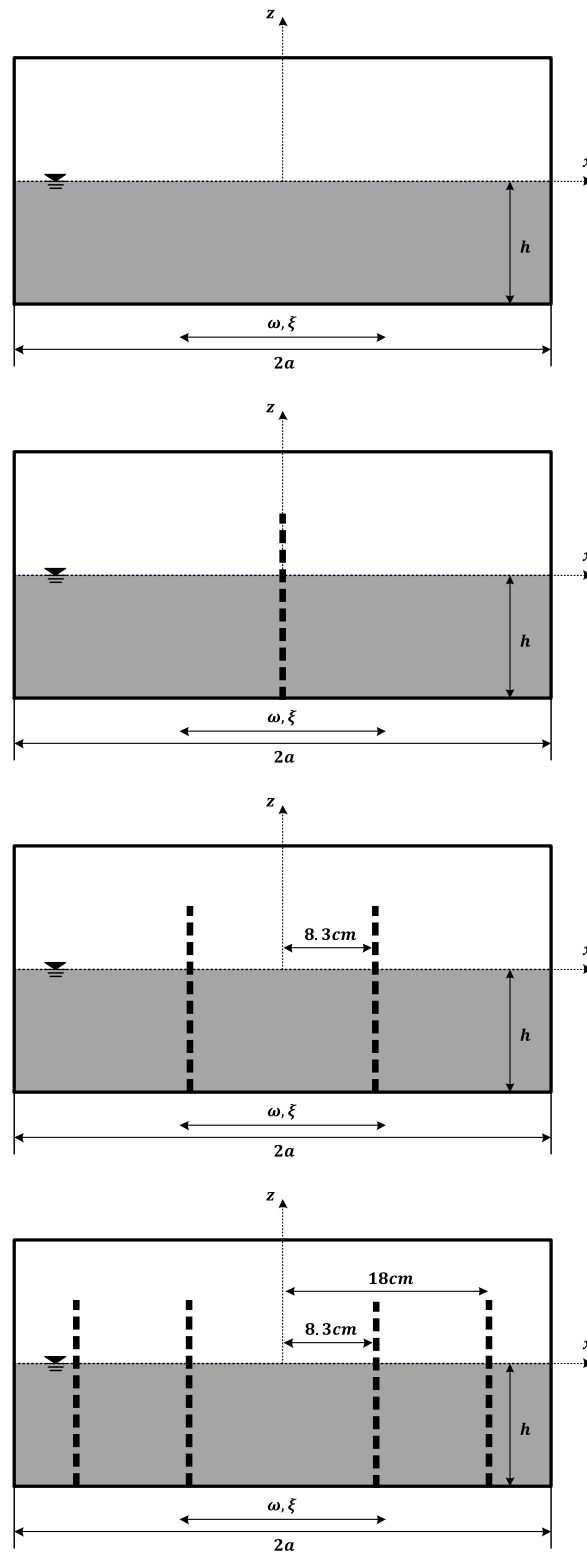


Fig. 3.10 Position and number of baffles used at model tests

제 4 장

실험결과

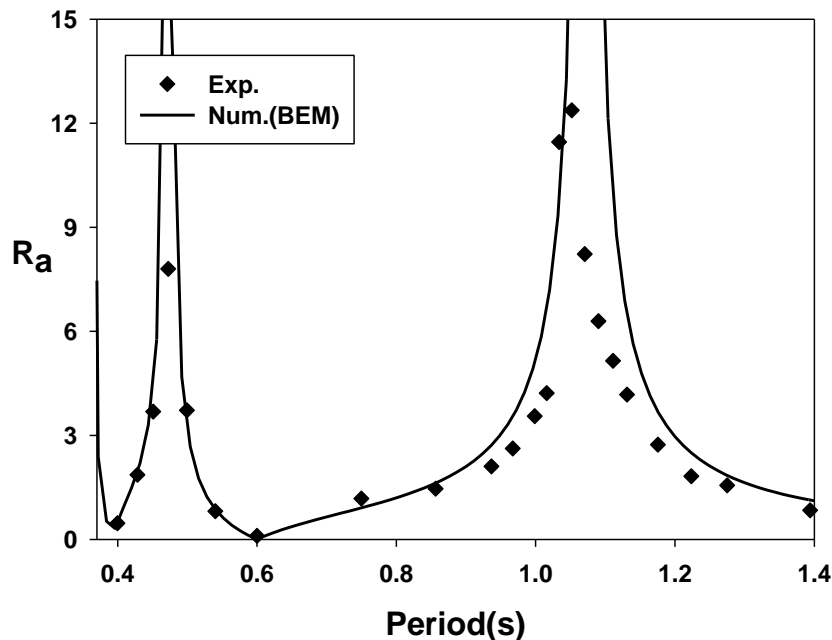
4.1 순수한 탱크 내 슬로싱

Fig. 4.1 은 내부재가 없는 순수한 사각 탱크에 대한 수치해석과 모형실험 증폭비 (R_a) 결과를 비교한 그림이다. x 축은 탱크의 운동주기이고 y 축은 탱크 벽면과 벽면으로부터 10cm 떨어진 지점에 대한 증폭비이다. 여기서 검은색 실선은 경계요소법을 사용한 수치해석 결과이고 기호(◆)는 모형실험 결과이다. 전반적으로 수치해석 결과와 모형실험 결과는 정성적으로 서로 잘 일치하지만 Fig. 4.1b에서 보는 것처럼 공진주기에서 수치해석 결과가 모형실험 결과보다 과대 평가된 것을 볼 수 있다. 이는 수치모델이 선형포텐셜이론에 기반을 두기 때문에 비선형 효과와 탱크 벽면에서의 마찰에 의한 점성 효과를 고려하지 않아서 생기는 차이로 사료된다. 하지만 공진주기를 제외한 다른 주기에서 두 결과는 정량적으로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

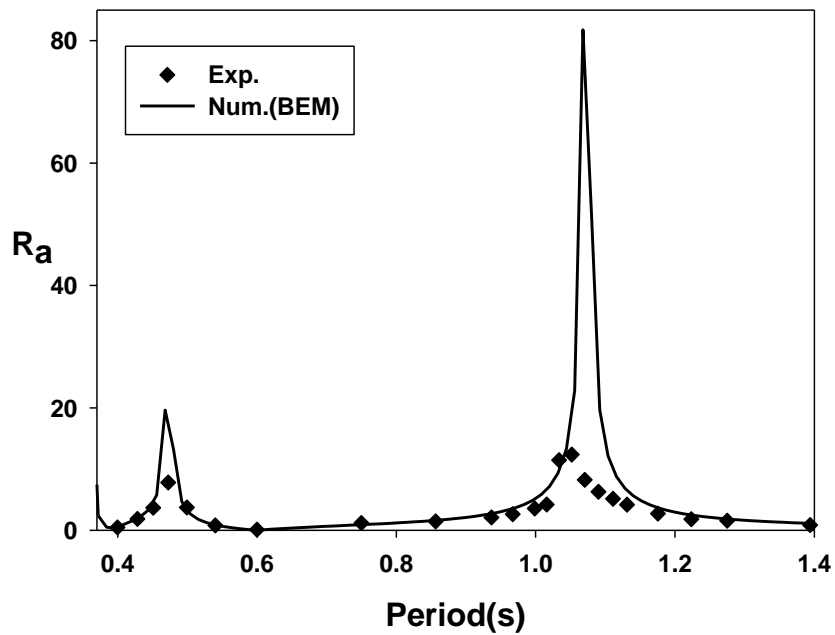
Fig. 4.1 에서 탱크의 운동주기가 약 0.5초와 1.1초 주변에서 증폭비가 큰 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 탱크 내 유체의 고유주기와 탱크의 운동주기가 일치됨으로 발생하는 공진현상으로 설명할 수 있다. 탱크의 길이가 $2a$ 이고 수심이 h 인 사각 탱크 내 유체의 고유주기를 산정하는 식은 다음과 같다(신장용 등, 2005).

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{gn\pi}{2a} \tanh\left(\frac{n\pi h}{2a}\right)}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.1)$$

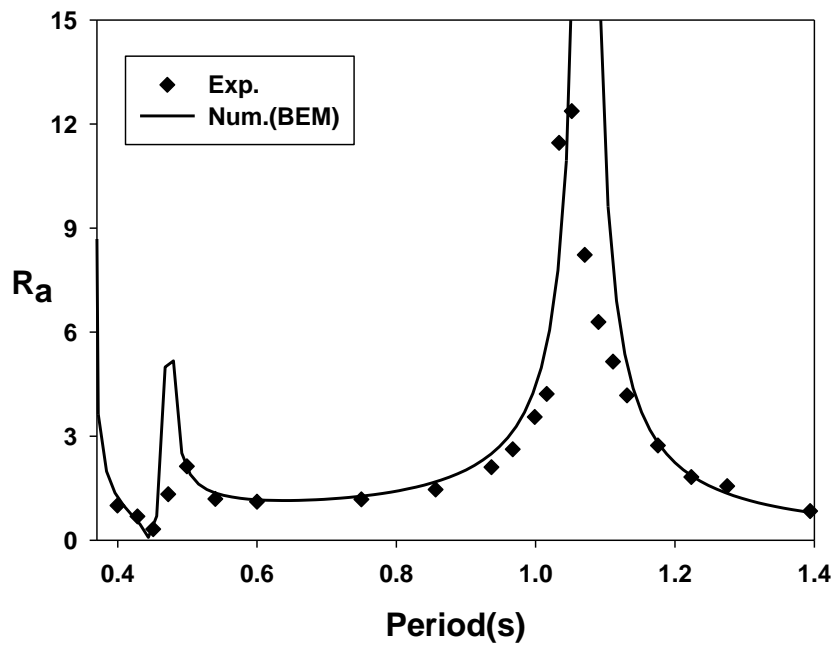
여기서 g 는 중력가속도, n 은 슬로싱 모드이다. 위 식을 이용하여 1차, 2차, 3차 고유모드에 대한 탱크 내 유체의 고유주기를 계산하면 약 1.07초와 0.61초, 0.47초이다. Fig. 4.1a 를 보면 1차와 3차 고유주기에서 증폭비가 큰 값을 보이나 2차 고유주기에서는 증폭비가 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 2차 공진모드에서 탱크 벽은 Node점을 갖기 때문이다. 특히 탱크 내 유체의 1차 고유주기에서 공진으로 인해 수위가 급격하게 커지고 유체가 탱크 벽을 치고 오르면서 얇은 막이 형성되는 처오름(Run-up) 현상을 확인할 수 있었다. Fig. 4.2 는 슬로싱 현상으로 탱크 벽면에 작용하는 압력을 비교한 그림이다. y 축은 탱크 바닥에서 2cm 떨어진 탱크 벽면에서 측정된 압력을 나타낸다. Fig. 4.2b 와 Fig. 4.1b 가 전반적으로 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 즉, 압력은 수위 변화에 크게 영향을 받고 특히 공진으로 벽면에서의 수위가 크게 증폭될 때 압력 또한 급격히 커지며 이는 탱크에게 큰 하중으로 작용된다. 수치계산 결과는 모형실험 결과를 잘 따르는 것을 알 수 있다. 비록 선형포텐셜 이론에 기반을 둔 수치해이지만 탱크 내의 슬로싱 현상을 규명하는데 잘 활용될 수 있음을 보여준다.



(a) On tank' s LHS wall

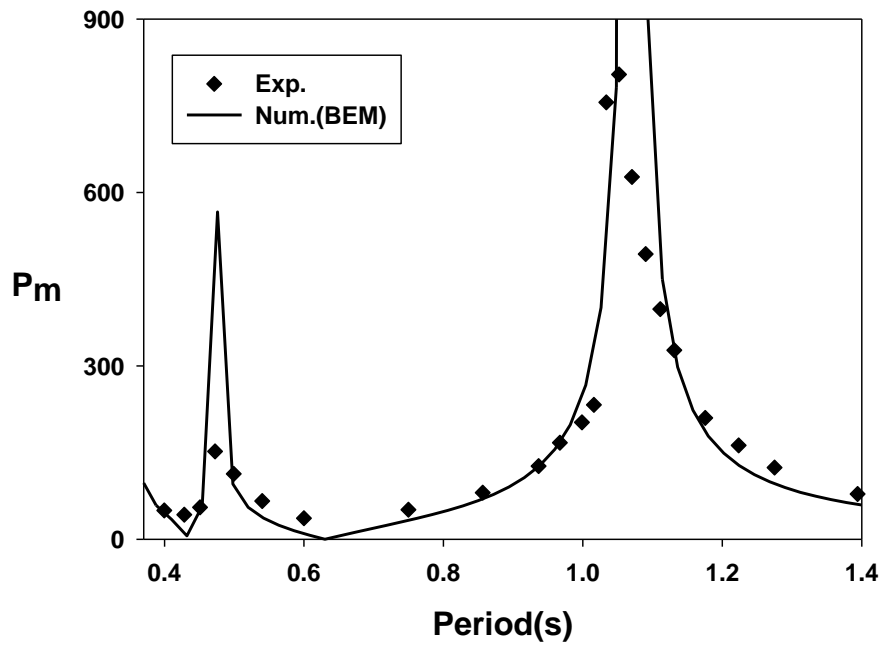


(b) On tank's LHS wall(Full scale)

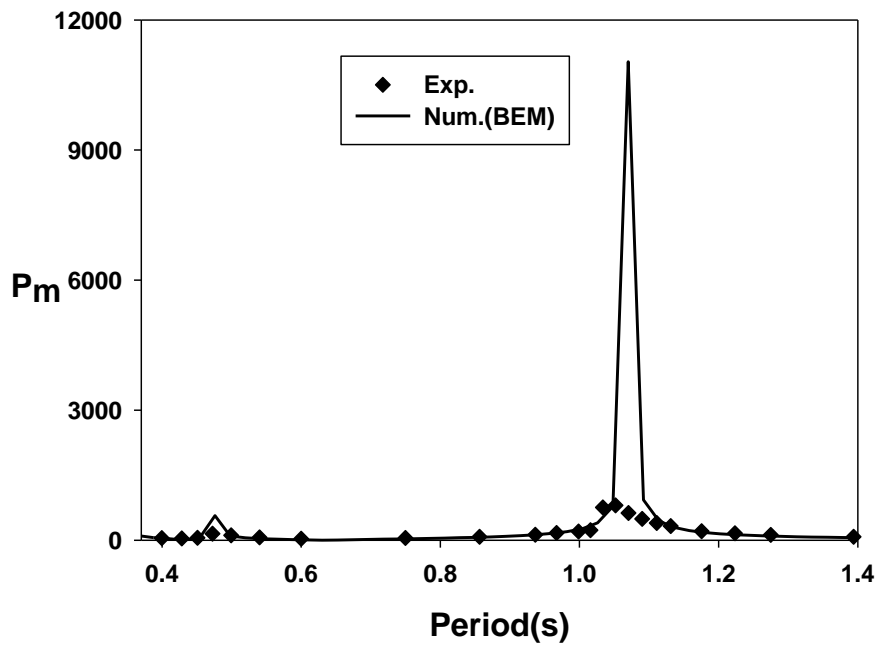


(c) 10cm apart from tank's LHS wall

Fig. 4.1 Comparison of amplification ratio between the experimental and numerical results



(a) On tank' s LHS wall



(b) On tank' s LHS wall(Full scale)

Fig. 4.2 Comparison of the pressure between the experimental and numerical results ($z = -8cm$)

4.2 타공판 실험

4.2.1 내부재 1개

Fig. 4.3 부터 Fig. 4.7 은 공극율(P)이 서로 다른 투과성 내부재 1개를 탱크 중앙에 수직으로 바닥까지 설치한 경우에 대한 수치해석 결과와 모형실험 결과를 비교한 그림이다. 불투과성 내부재 1개를 설치할 경우 탱크 내 유체가 두 개의 영역으로 나뉘어져 탱크의 길이가 반으로 줄어들게 되고 탱크 내 유체의 고유주기를 구하는 식은 아래와 같다.

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{gn\pi}{(2a/2)} \tanh\left\{\frac{n\pi h}{(2a/2)}\right\}}}, \quad n=1,2,3,\dots \quad (4.2)$$

따라서 탱크 내 유체의 1차, 2차, 3차 고유주기는 약 0.61초, 0.40초, 0.32초이다. 본 모형실험에서는 투과성 내부재를 사용하였기 때문에 불투과성 내부재를 설치한 경우를 고려해 산정한 고유주기와 비교하였을 때 다른 결과를 보여줄 것으로 예측된다.

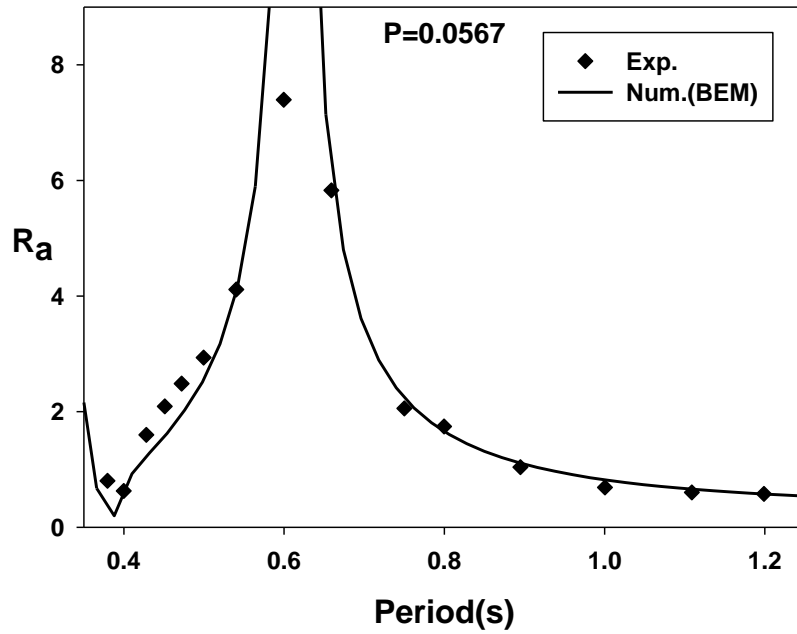


Fig. 4.3 Comparison of amplification ratio ($x=-a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P=0.0567, d/h=1.0$)

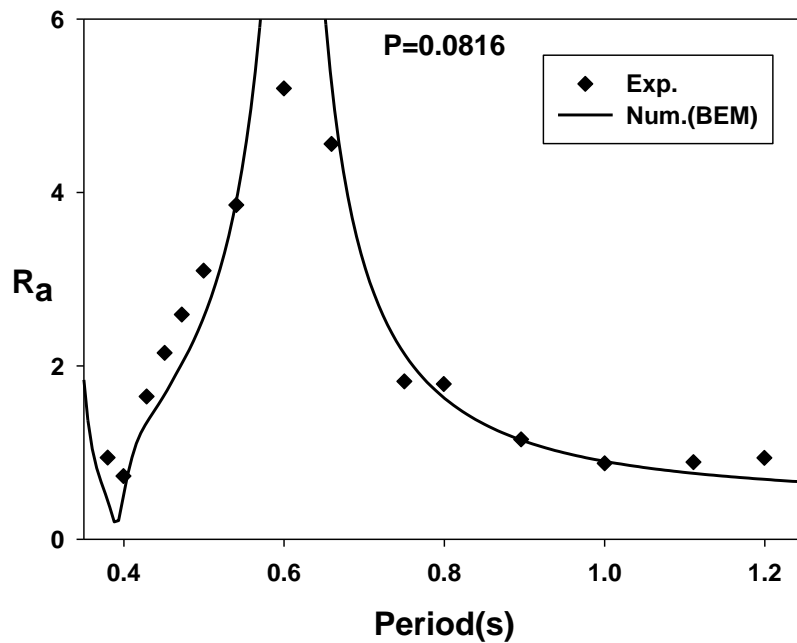


Fig. 4.4 Comparison of amplification ratio ($x=-a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P=0.0816, d/h=1.0$)

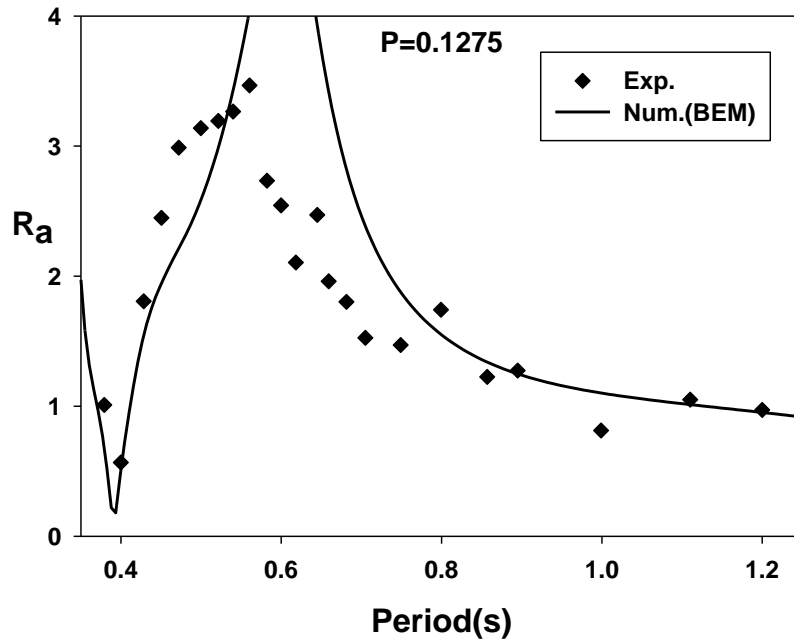


Fig. 4.5 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.1275, d / h = 1.0$)

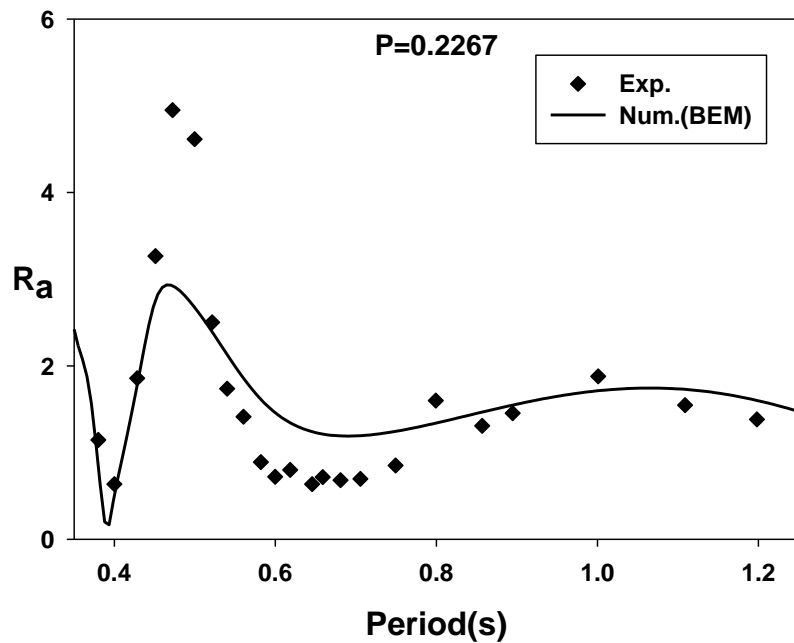


Fig. 4.6 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.2267, d / h = 1.0$)

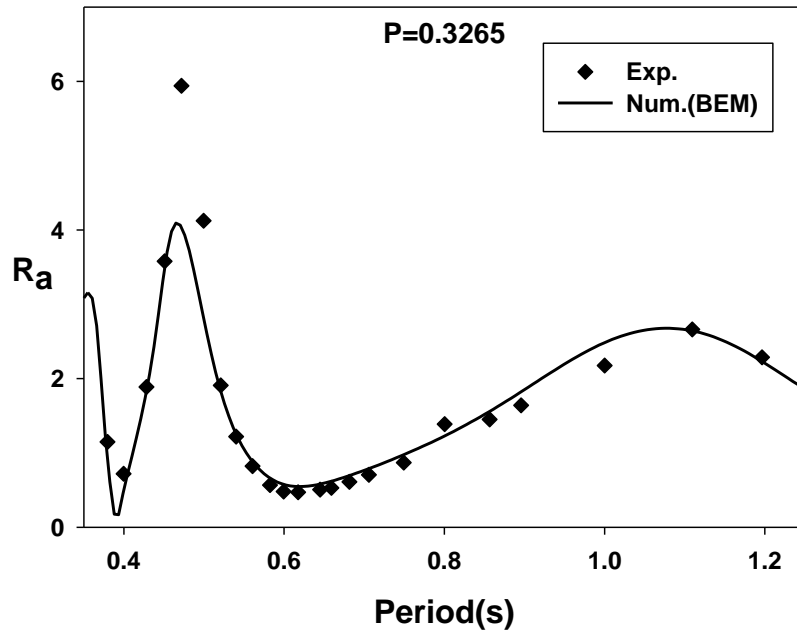


Fig. 4.7 Comparison of amplification ratio ($x=-a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.3265, d/h = 1.0$)

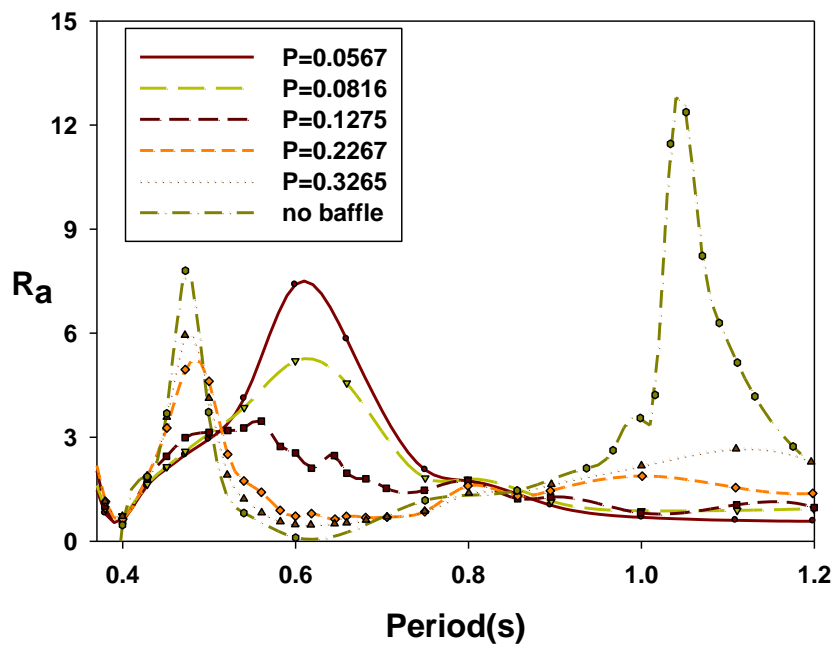


Fig. 4.8 Comparison of the amplification factor as function of porosities of porous baffle ($d/h = 1.0$)

그래프를 통해 설치된 내부재의 공극율에 따라 탱크 내 유체의 고유주기와 증폭비가 달라짐을 확인할 수 있다. 경계요소법을 사용한 수치계산 결과는 모형실험 결과를 잘 따라가고 있음을 확인하였다. 공극율이 작은 경우 ($P=0.0567, 0.0816, 0.1275$) 불투과성 내부재가 놓여 있을 때의 공진주기인 0.61초 주변에서 탱크 벽면에서의 증폭비는 크게 증폭한다. 그러나 공극율이 큰 경우 ($P=0.2267, 0.3265$) 앞에서 살펴본 순수한 탱크 내에서의 1차, 3차 고유주기인 약 1.07초와 0.47초에서 공진에 의한 큰 증폭비를 보인다. 특히 흥미로운 사실은 약 0.47초에서 나타나는 공진현상에 대해 모형실험 결과가 수치계산 결과보다 크게 나타남을 볼 수 있다. 이는 탱크 내 유체가 내부재의 구멍을 통과하면서 생기는 와류의 영향을 받는 시간 보다 탱크의 운동주기가 상대적으로 짧아서 생기는 차이로 사료된다. 이를 통해 내부재의 공극율에 따라 탱크 내 유체의 고유주기와 증폭비 결과가 달라진다는 것을 알 수 있다. 따라서 외력의 운동주기를 검토하여 내부재의 공극율을 조절해서 탱크 내 유체의 고유주기를 이동시켜 공진이 발생하지 않도록 할 수 있다. 또한 투과성 내부재는 운동하는 유체가 원형 구멍을 통과하면서 발생하는 난류 현상으로 탱크 내 에너지를 소멸시키므로 공진주기에서 탱크 내 슬로싱 현상을 줄이는데 기여한다.

Fig. 4.8 은 모든 공극율 변화에 따른 증폭비 결과를 비교하는 그래프이다. 모형실험 결과를 통해 내부재를 1개 설치할 경우 내부재가 없는 순수한 탱크에 대한 증폭비 보다 크게 감소하고 공극율이 작을 경우 탱크 내 유체의 1차 고유주기는 약 0.61초이지만 공극율이 커질수록 순수한 탱크의 1차와 3차 고유주기로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 공극율이 커질수록 개방되는 면적이 증가하여 탱크 내 유체가 자유롭게 움직일 수 있기 때문에 순수한 탱크와 같은 효과를 보여주는 것으로 사료된다.

Fig. 4.9 부터 Fig. 4.12 는 앞에서와 같은 조건에 대하여 탱크 벽으로부터 10cm 떨어진 지점에서의 증폭비 결과이다. 탱크 벽면에서의 결과와 같이 모형실험 결과와 수치해석 결과는 정량적인 값 차이를 보이지만 정성적으로 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

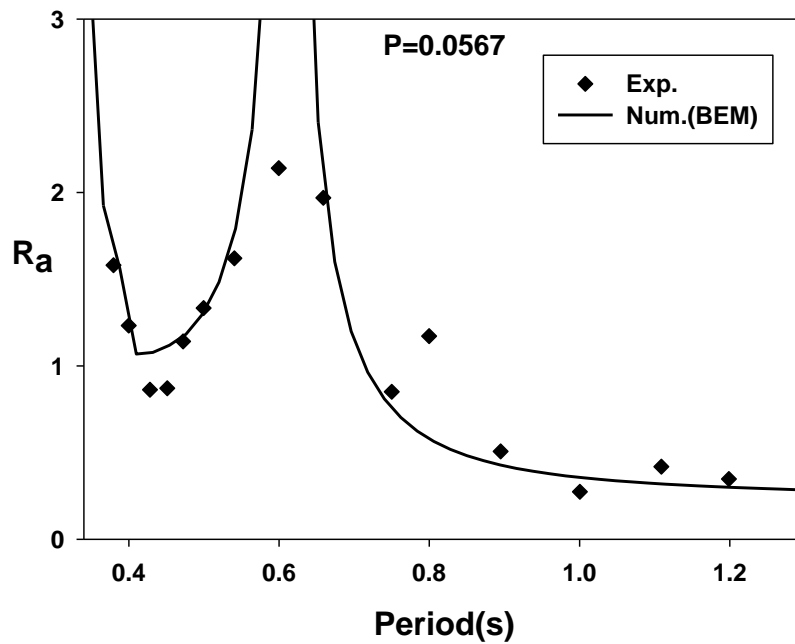


Fig. 4.9 Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.0567, d / h = 1.0$)

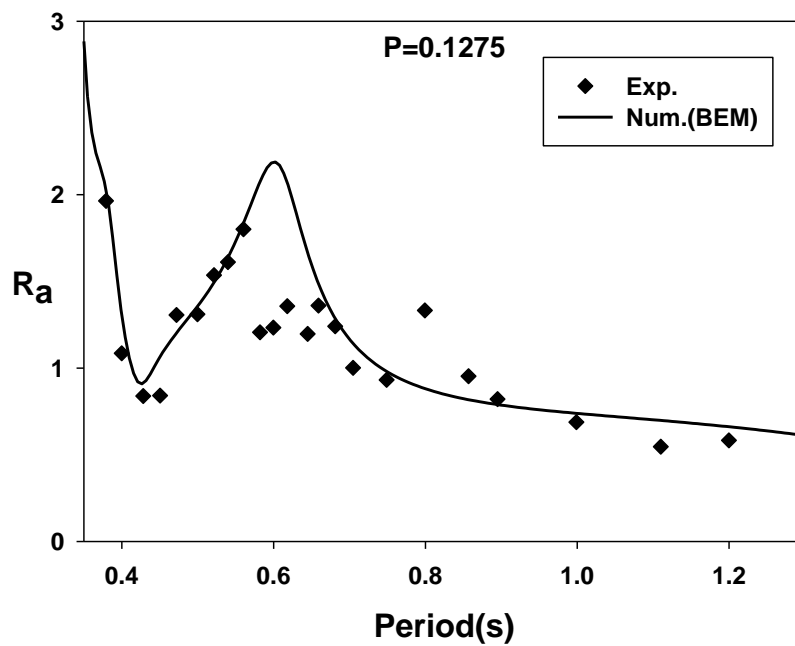


Fig. 4.10 Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.1275, d / h = 1.0$)

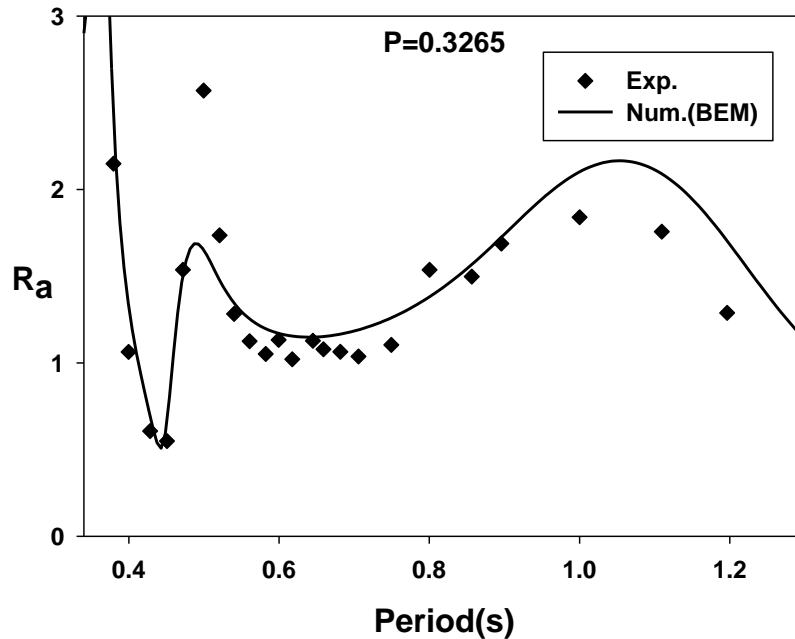


Fig. 4.11 Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.3265, d/h = 1.0$)

Fig. 4.12 부터 Fig. 4.14 는 공극율 변화에 따른 탱크 벽면에 작용하는 압력 (P_m) 을 나타낸 그래프이다. y 축에 나타난 탱크 벽면에서의 압력은 압력신호의 최댓값과 최솟값의 차이를 의미한다. 벽면에서의 증폭비 곡선과 마찬가지로 공극율이 작은 내부재가 설치되었을 때 내부재로 인해 유체영역이 나뉘게 되므로 탱크의 운동주기가 0.61초 주변에서 공진으로 인해 벽면에서의 압력이 커진다. 그러나 공극율이 큰 $P=0.3265$ 인 경우에는 내부재를 통하여 유체가 비교적 자유롭게 이동하므로 내부재의 효과가 작아지고 내부재가 없는 순수한 탱크에서 보이는 압력 결과와 비슷한 경향을 나타낸다. 따라서 주기가 약 0.47초와 1.1초에서 공진현상이 일어나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.15 는 공극율 변화에 따른 탱크 벽면에서의 압력을 그린 그래프이다. 공극율이 0.0567과 0.0816인 경우 공진주기에서 큰 압력차이를 보이지만 공진주기 이후 압력이 점차적으로 감소해 최솟값을 보이고 있다. 공극율이 큰 경우 나뉜 유체영역간 개방되는 부분이 증가하는 영향으로 순수한 탱크에서

보였던 주기 약 0.47초와 1.1초에서 공진현상이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 공극율이 0.1275인 내부재의 경우 공진주기를 포함한 모든 운동주기에서 상대적으로 압력이 낮게 측정되었다.

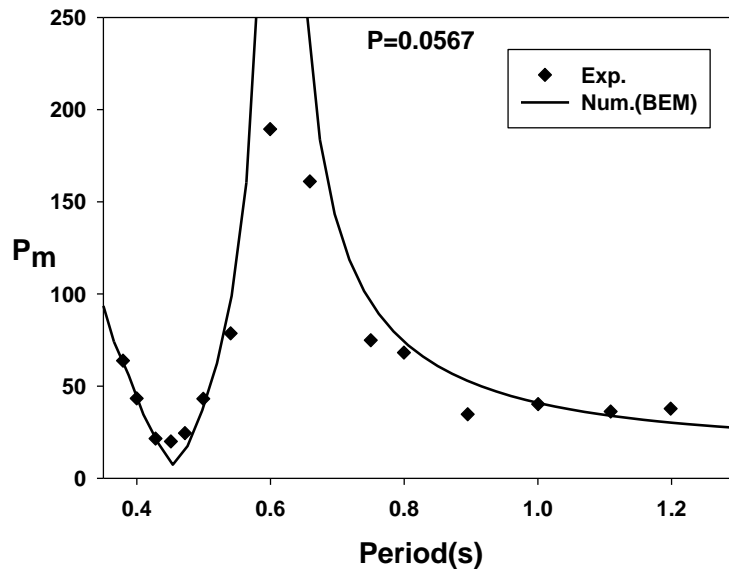


Fig. 4.12 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.0567, d/h = 1.0$)

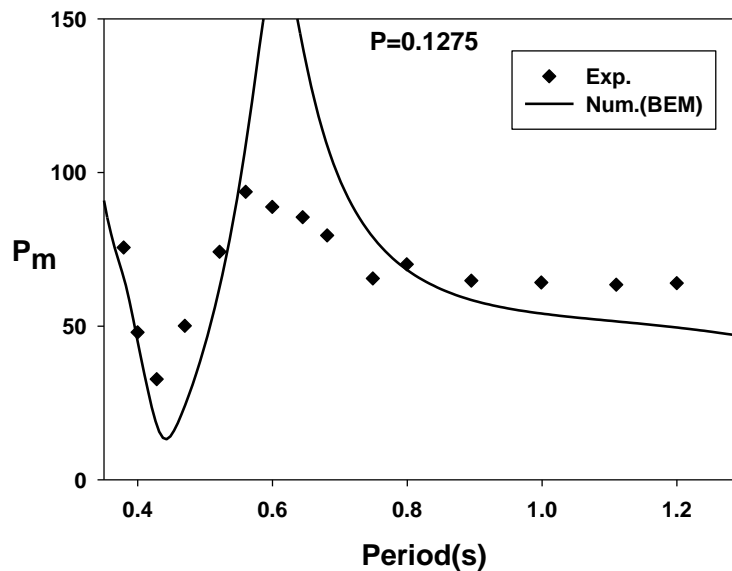


Fig. 4.13 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.1275, d/h = 1.0$)

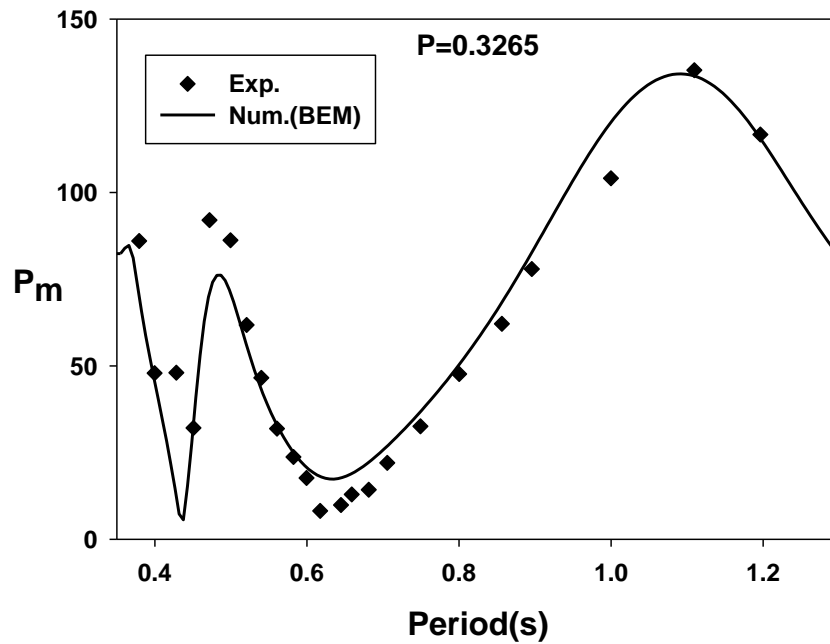


Fig. 4.14 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.3265, d / h = 1.0$)

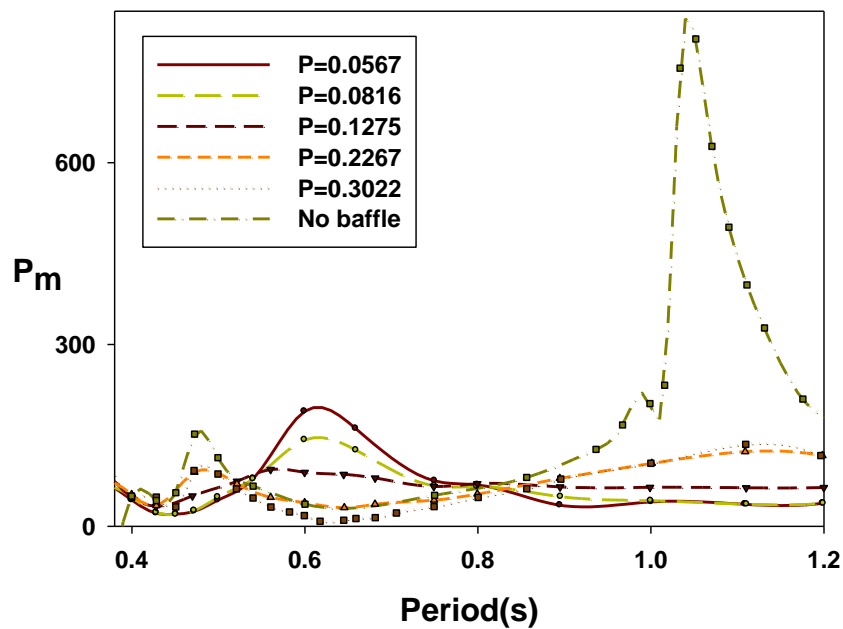


Fig. 4.15 Comparison of the measured pressure as function of porosities of porous baffle ($d / h = 1.0$)

지금까지의 결과는 내부재를 수직으로 탱크 바닥까지 설치한 경우이다. 다음은 내부재를 수심의 중간 위치에 ($d/h=0.5$) 잠기도록 설치해서 앞에서와 동일한 실험을 반복하였다. Fig. 4.16 에서 Fig. 4.18 은 탱크 벽면에서의 증폭비를 나타내는 그래프이다. 공극율이 작은 0.0567과 0.1275의 경우 내부재를 바닥까지 설치한 결과와 비교하였을 때 탱크 내 유체의 고유주기가 달라진 것을 볼 수 있다. 이는 내부재 하부가 완전히 뚫려있기 때문에 공극율이 작아도 마치 내부재가 없는 순수한 탱크에서 일어나는 현상이 나타난다. 그러나 공극율이 가장 큰 $P=0.3265$ 에서는 앞에서 살펴본 Fig. 4.7과 비슷한 경향을 볼 수 있다. 전반적으로 수치계산 결과와 모형실험 결과는 잘 일치함을 보이고 있다.

Fig. 4.19 그래프를 보면 벽면에서의 증폭비는 5개의 공극율에서 모두 비슷한 경향을 보이고 있다. 공극율이 작은 세 내부재는 전 주기 범위 내에서 서로 유사한 증폭비를 보이고 공극율이 큰 다른 두 내부재 보다 증폭비가 작게 나타났다. Fig. 4.8 과 비교하면 공극율이 작은 경우 공진주기에서 내부재가 일정 깊이 잠겼을 때의 증폭비가 바닥까지 놓인 경우보다 줄어들음을 볼 수 있다. 그러나 내부재의 잠긴 깊이에 반비례하여 증폭비가 반으로 줄어들지 않았다. 이는 탱크 내의 파랑에너지의 분포가 수면에서 가장 크고 깊이에 따라 쌍곡선 함수로 줄어들기 때문이다. 하지만 공극율이 0.1275인 경우엔 내부재 하부가 개방된 영향으로 증폭비가 더 커지게 된다.

위 결과들을 종합해보면 공극율이 0.1275인 내부재 1개를 바닥까지 설치했을 때 가장 우수한 슬로싱 억제 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

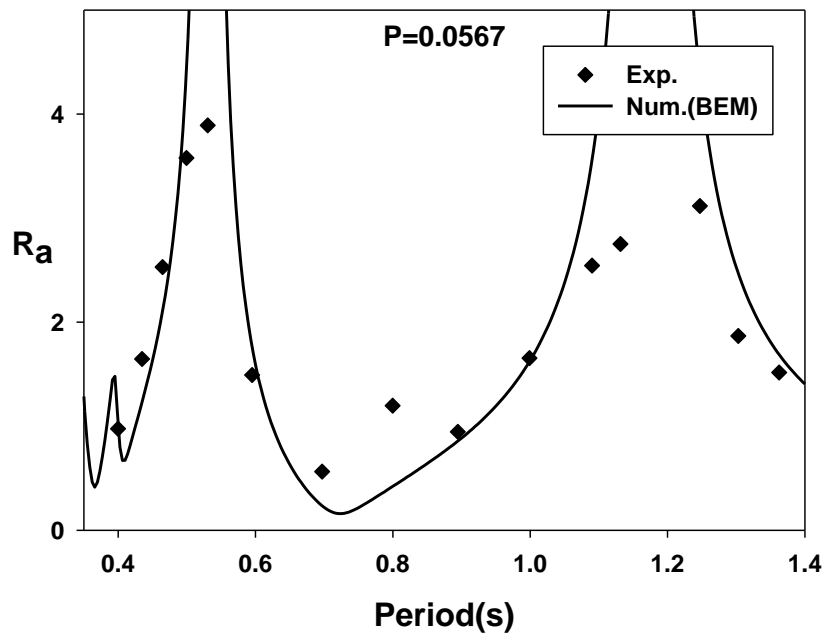


Fig. 4.16 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.0567, d / h = 0.5$)

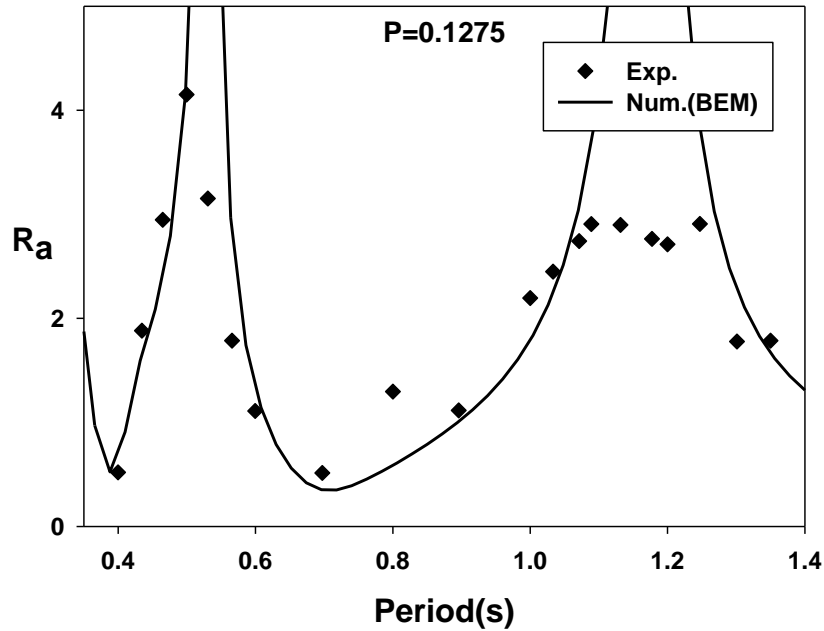


Fig. 4.17 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.1275, d / h = 0.5$)

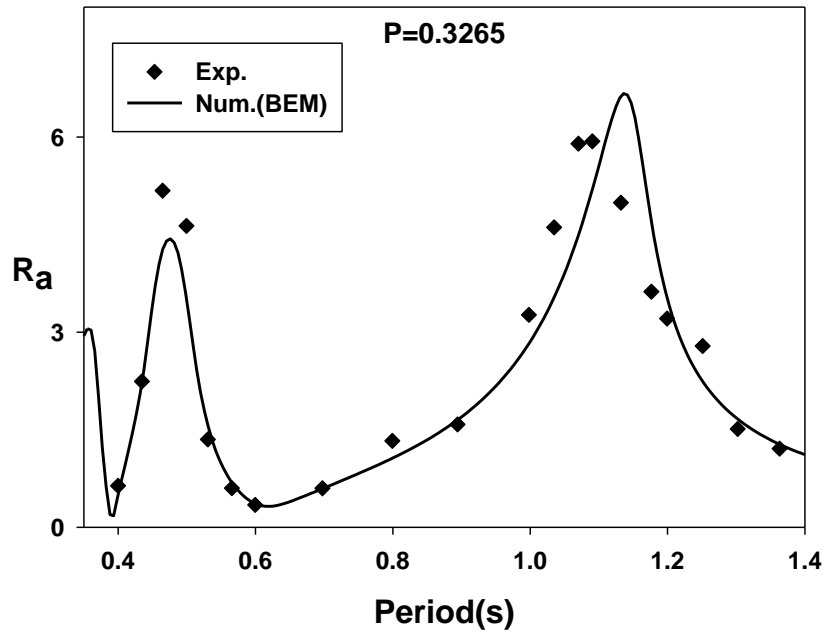


Fig. 4.18 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.3265, d / h = 0.5$)

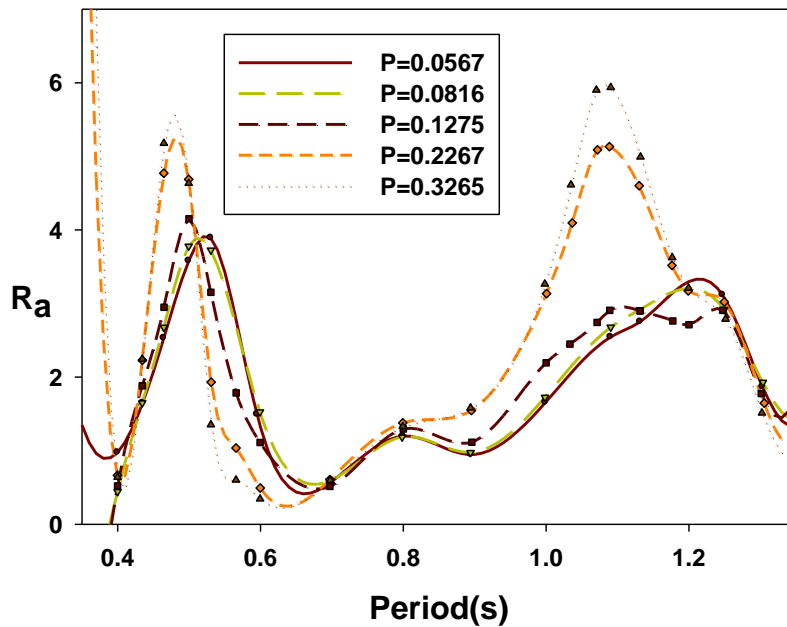


Fig. 4.19 Comparison of the amplification factor as function of porosities of porous baffle ($d / h = 0.5$)

Fig. 4.20 에서 Fig. 4.22 는 탱크 벽면에서 10cm 떨어진 지점에서의 증폭비를 그린 그림이다. 수치해석 결과와 모형실험 결과는 비슷한 경향을 나타내었다. Fig. 4.23 부터 Fig. 4.25 는 탱크 벽면에서의 압력을 보여주고 있다. 내부재를 바닥까지 설치한 경우와 같이 증폭비 곡선과 벽면에서의 압력 곡선이 서로 비슷한 경향을 보여주는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4.26 에서는 공극율에 따른 벽면에서의 압력을 비교하였다. 공극율에 관계없이 탱크의 수평운동주기에 따라 비슷한 압력 곡선을 보여주고 있다. 공극율이 작은 세 내부재를 수심에 반만큼 잠기게 설치하였을 때 압력곡선은 서로 비슷하며 공극율이 큰 다른 두 내부재 보다 압력이 작게 측정됨을 확인할 수 있다.

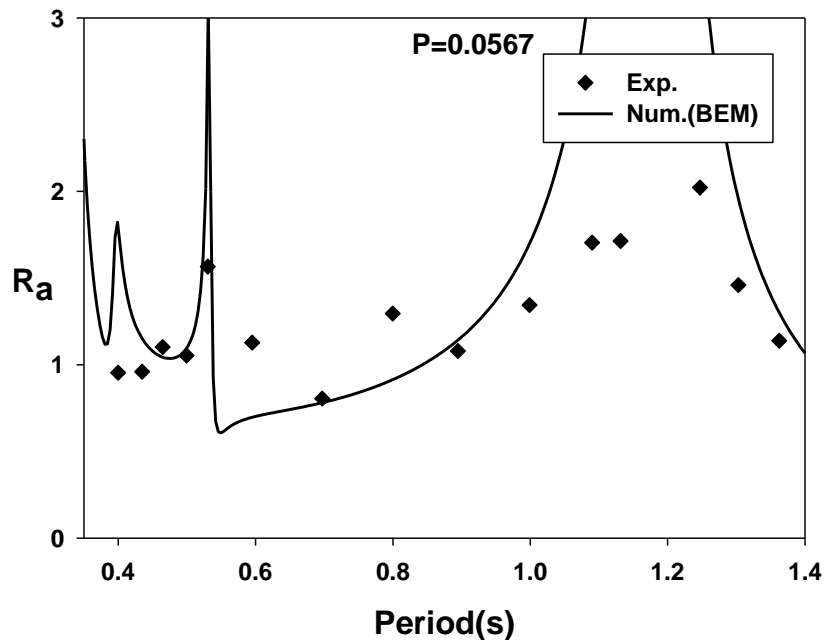


Fig. 4.20 Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.0567, d/h = 0.5$)

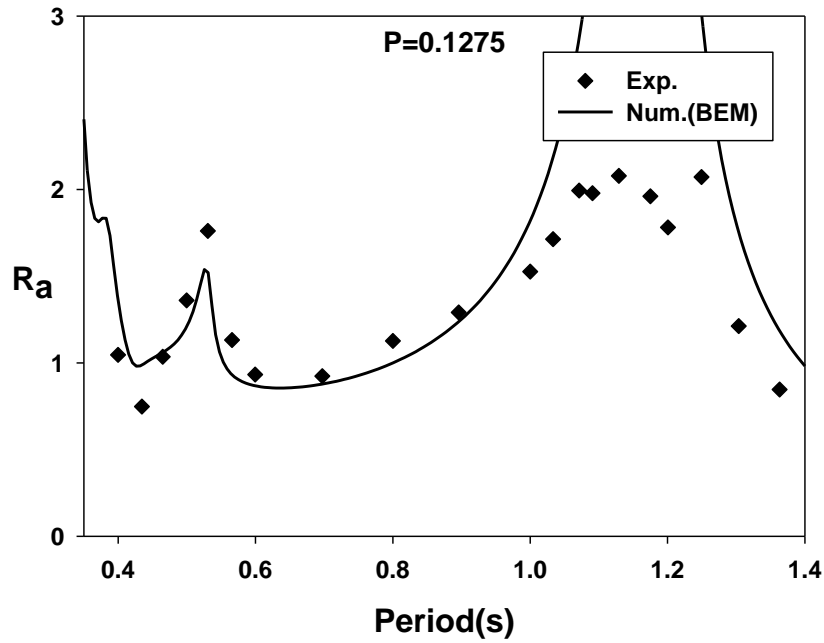


Fig. 4.21 Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.1275, d / h = 0.5$)

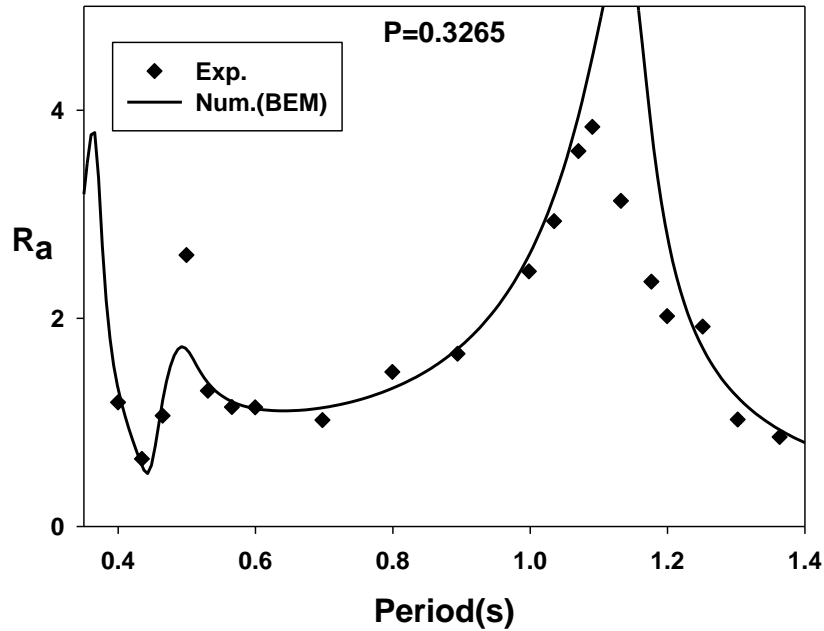


Fig. 4.22 Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.3265, d / h = 0.5$)

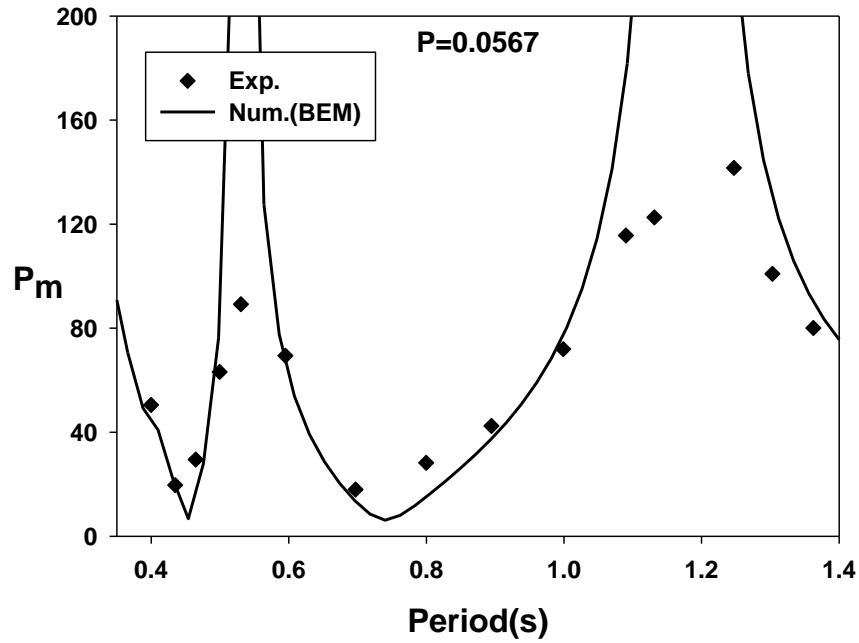


Fig. 4.23 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.0567, d/h = 0.5$)

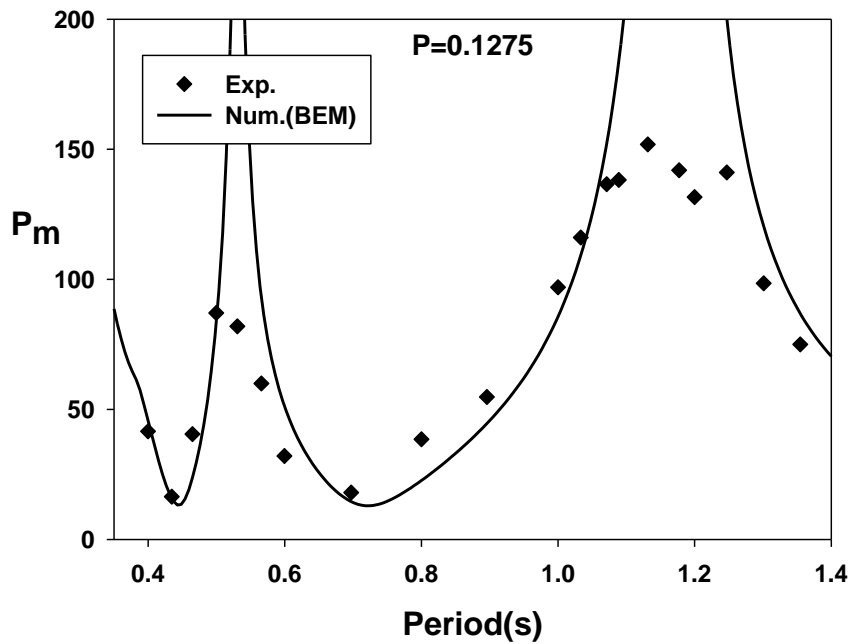


Fig. 4.24 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.1275, d/h = 0.5$)

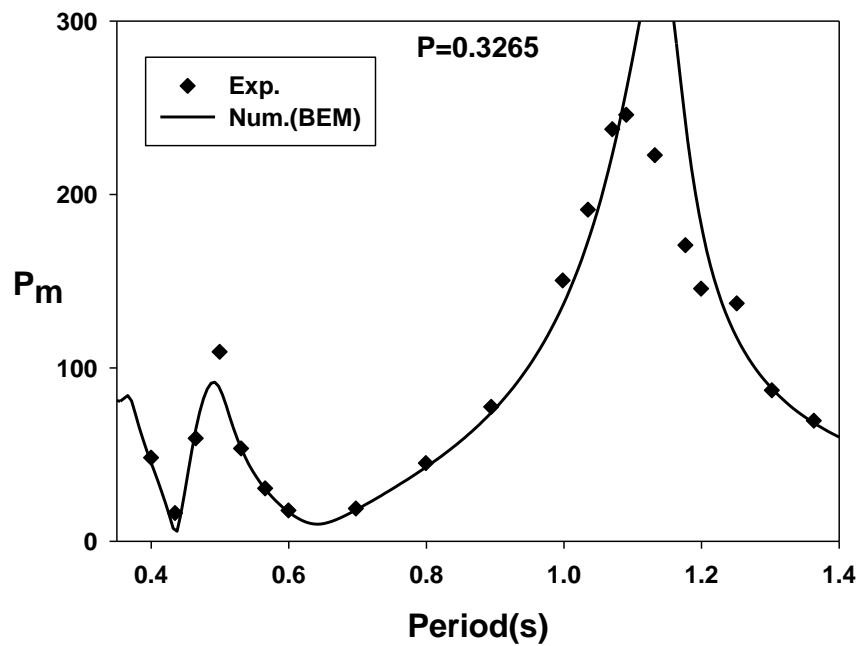


Fig. 4.25 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for single porous baffle placed at the center ($P = 0.3265, d / h = 0.5$)

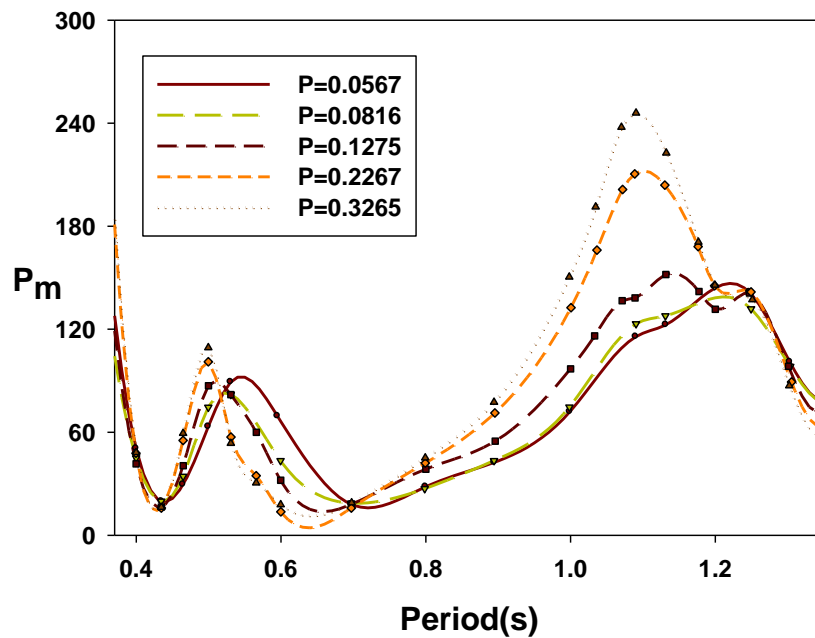


Fig. 4.26 Comparison of the pressure as function of porosities of porous baffle ($d / h = 0.5$)

4.2.2 내부재 2개 실험

Fig. 4.27 부터 Fig. 4.29 는 공극율이 같은 내부재 2개를 바닥까지 설치하였을 때 탱크 벽면의 증폭비 결과이다. 불투과성 내부재가 설치된 것으로 가정하였을 때 탱크 내 유체의 1차, 2차, 3차 고유주기는 약 0.47초, 0.32초, 0.26초이다. 실험 중 탱크의 운동주기 범위 내에서 공진으로 인한 탱크 내 유체의 급격한 유동과 함께 3차원적인 유동의 효과까지 포함된 비선형적인 특성을 보이는 경우도 있었다. 그래프를 통해 탱크의 운동주기 약 0.47초 주변에서 공진현상이 일어나 증폭비가 크게 커지는 것을 확인할 수 있다. 공극율이 가장 큰 $P=0.3265$ 에 대한 증폭비를 그린 Fig. 4.29 에서 볼 수 있듯이 공진주기 0.47초 외에 약 1.07초에서 다시 한 번 공진 현상이 생기는 것을 확인할 수 있다. 앞선 내부재 1개를 설치한 경우와 비교하면 내부재를 2개 설치하는 경우가 공진주기에서 더 큰 증폭비를 나타내고 있다. 그러나 공진주기를 제외한 나머지 주기 영역에서는 비슷한 크기의 증폭비를 보이고 있다. Fig. 4.30 은 공극율에 따른 증폭비에 대한 모형실험 결과를 비교한 그래프이다. Fig. 4.8 과 비교하였을 때 모든 공극율에서 탱크의 운동주기에 따라 비슷한 증폭비의 패턴을 보이는 것을 알 수 있다. 모형실험 결과를 통해 탱크의 운동주기가 약 0.47초 주변에서 공진현상이 생기고 증폭비는 큰 값을 가지며 공진영역을 제외한 나머지 운동주기에서는 증폭비에 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 하지만 공극율이 작은 경우 탱크 내 유체의 고유주기가 약 0.47초로 작아지고 공진현상이 일어나는 탱크 운동주기의 범위도 상대적으로 좁아지기 때문에 보다 넓은 영역에서 작은 증폭비를 보여주고 있다.

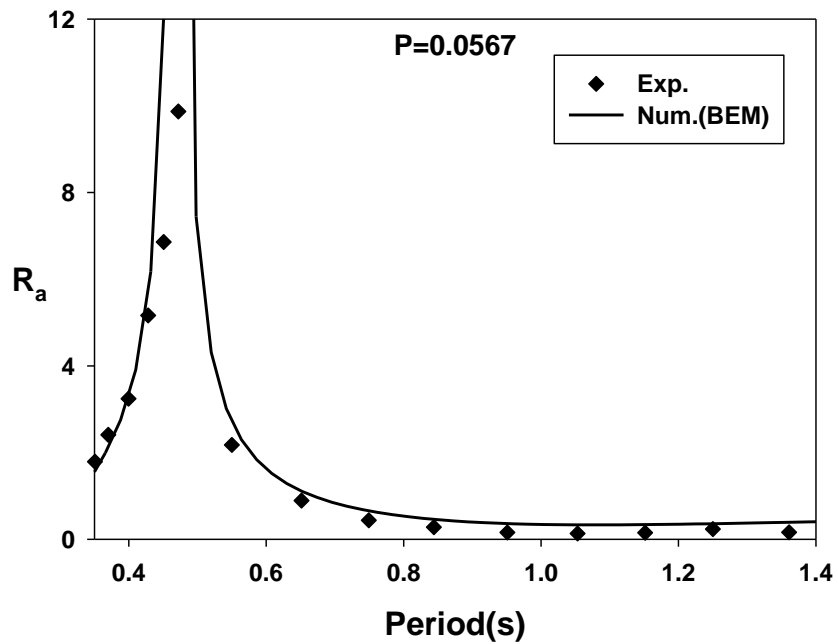


Fig. 4.27 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.0567, d/h = 1.0$)

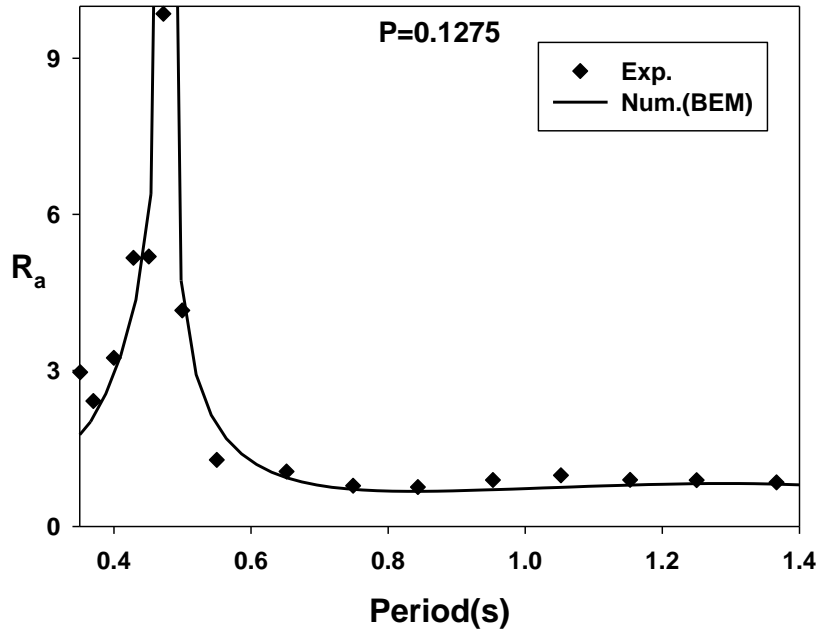


Fig. 4.28 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.1275, d/h = 1.0$)

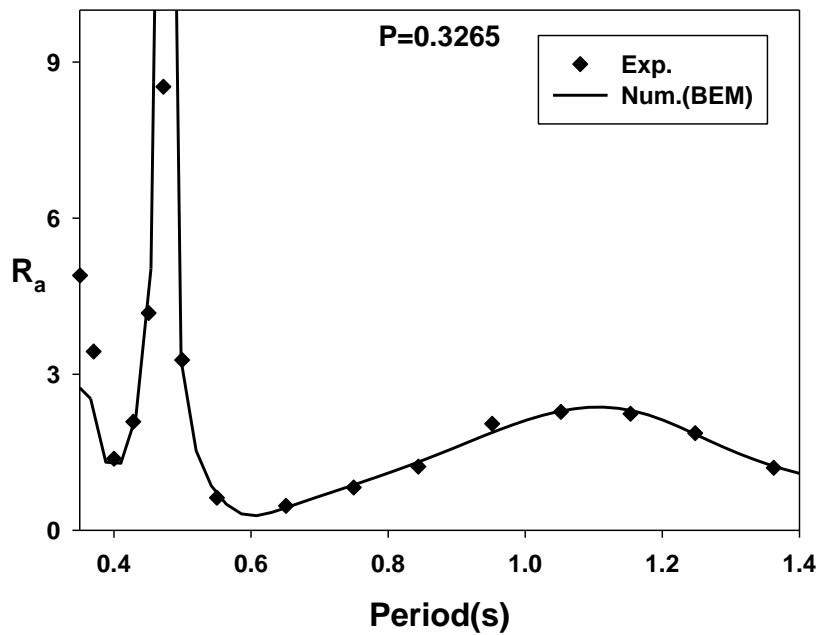


Fig. 4.29 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3\text{cm}$ ($P = 0.3265, d/h = 1.0$)

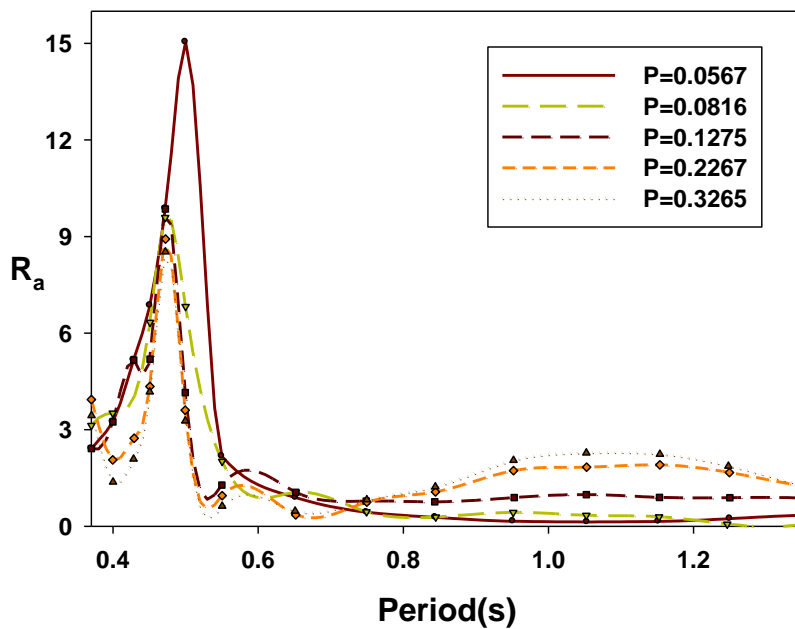


Fig. 4.30 Comparison of the amplification factor as function of porosities of two porous baffles ($d/h = 1.0$)

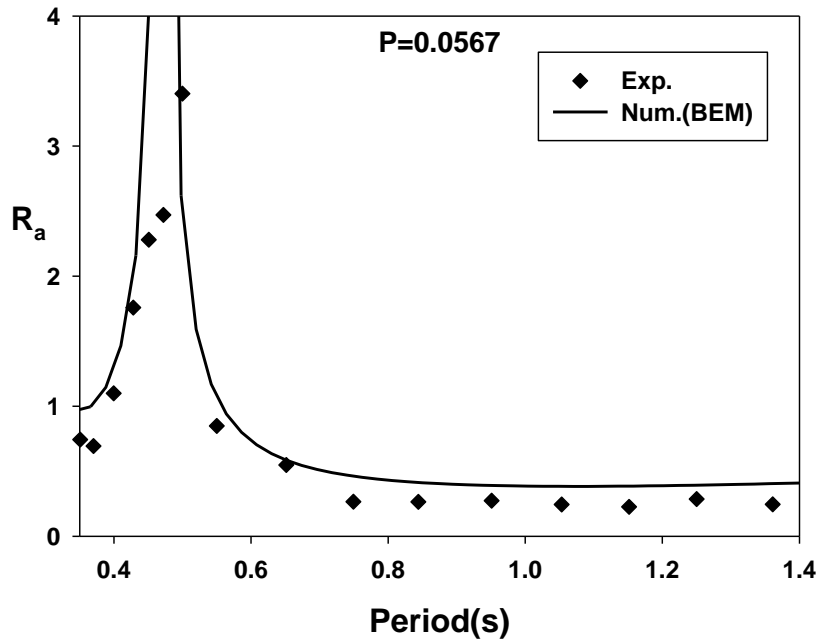


Fig. 4.31 Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.0567, d/h = 1.0$)

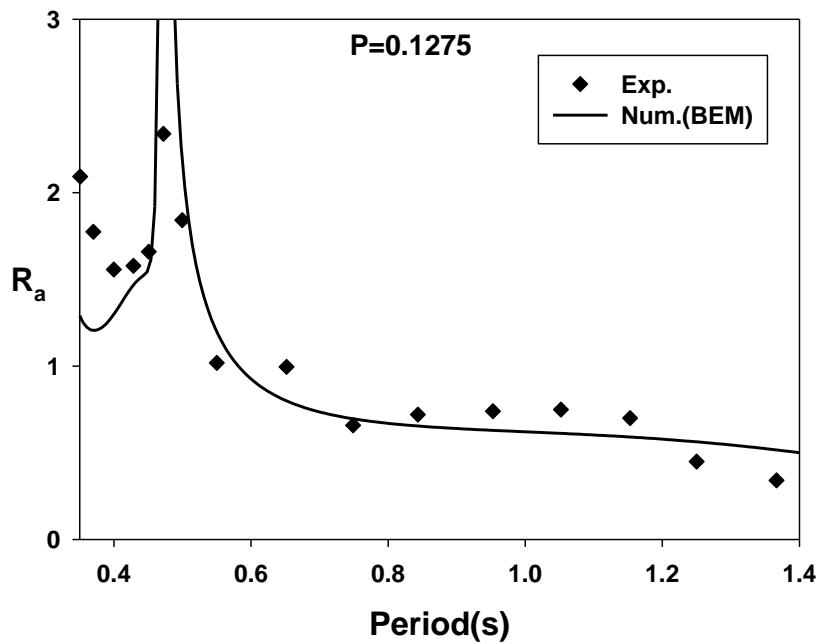


Fig. 4.32 Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.1275, d/h = 1.0$)

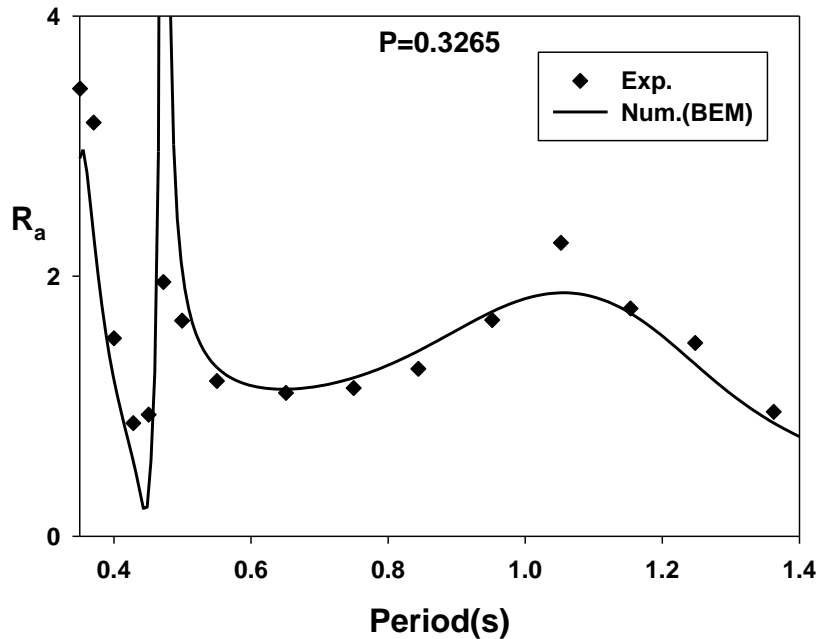


Fig. 4.33 Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3\text{cm}$ ($P = 0.3265, d/h = 1.0$)

Fig. 4.31 부터 Fig. 4.33 은 탱크 벽면에서 10cm 떨어진 지점에서의 증폭비를 보여주고 있다. 앞선 벽면에서의 증폭비 결과와 비슷한 경향을 보여주고 있다. Fig. 4.34 부터 Fig. 4.36 은 탱크 벽면에 작용하는 압력을 보여주고 있다. 모형실험 결과와 수치해석 결과 모두 증폭비의 결과와 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 공극율이 가장 큰 $P = 0.3265$ 일 때 개방된 내부재의 영향으로 공극율이 작은 내부재에서 공진현상이 나타나지 않았던 운동주기 1.07초에서 다시 한 번 공진현상이 일어남을 Fig. 4.36 을 통하여 확인할 수 있다. Fig. 4.37 은 공극율 변화에 따른 벽면에서의 압력에 대한 모형실험 결과를 비교한 그림이다. 공진주기 약 0.47초에서 공극율이 가장 작은 0.0567을 제외한 나머지 4개의 공극율에서 비슷한 압력값을 보인다. 장주기 영역인 공진주기 1.07초에서 공극율이 작은 내부재는 공진현상이 나타나지 않지만 공극율이 큰 내부재를 사용한 경우 공진 주기 0.47초에서 보다는 작지만 다시 한 번 압력의 최댓값이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

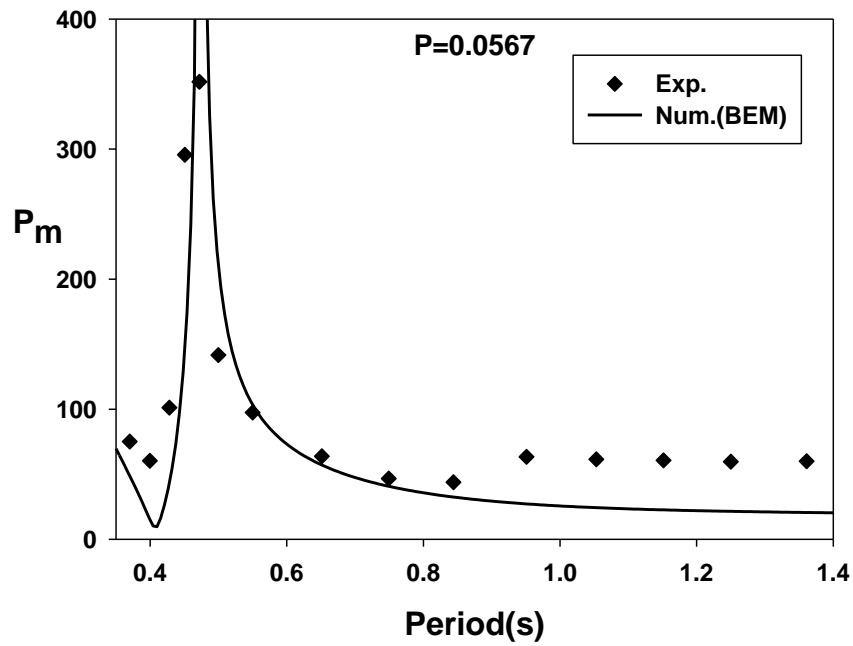


Fig. 4.34 Comparison of pressure ($x=-a, z=-8cm$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x=\pm 8.3cm$ ($P=0.0567, d/h=1.0$)

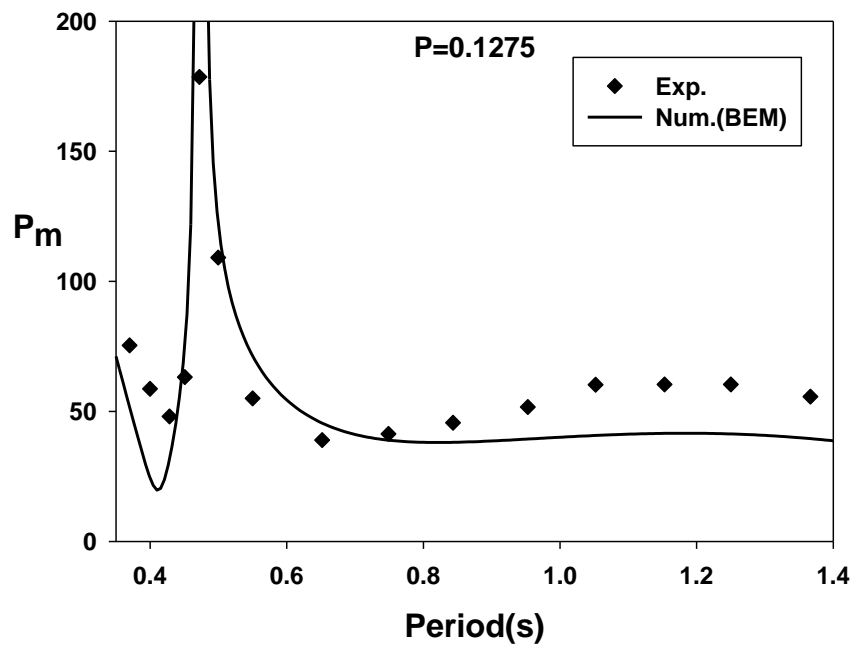


Fig. 4.35 Comparison of pressure ($x=-a, z=-8cm$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x=\pm 8.3cm$ ($P=0.1275, d/h=1.0$)

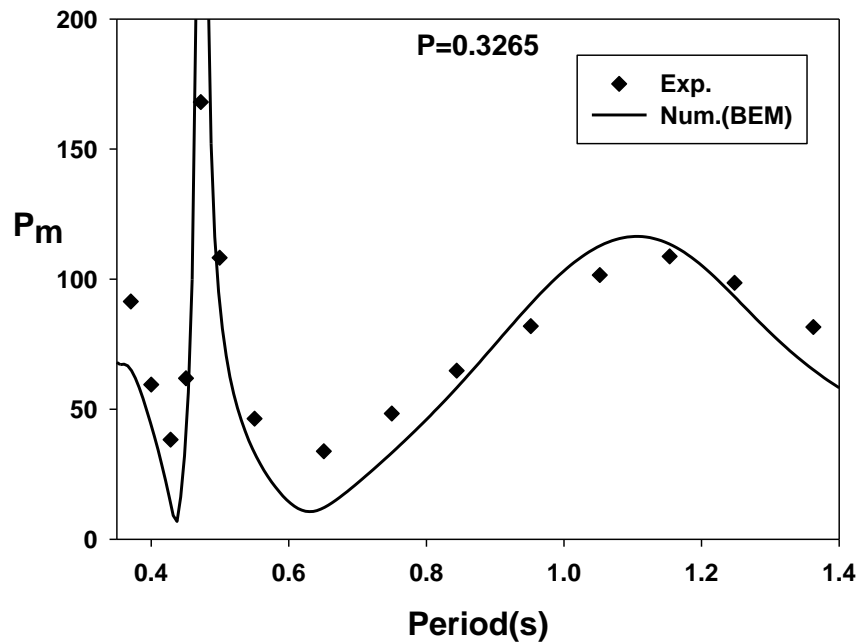


Fig. 4.36 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.3265, d/h = 1.0$)

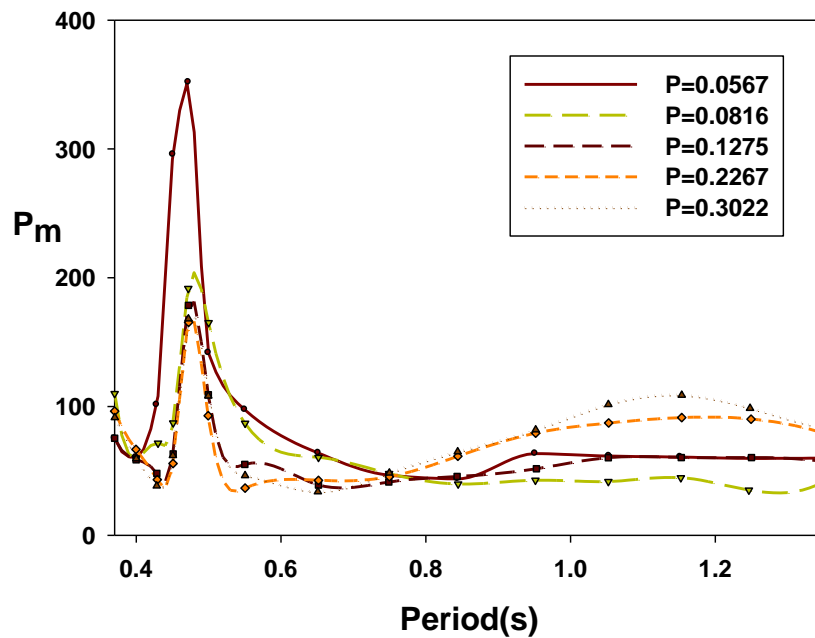


Fig. 4.37 Comparison of the pressure as function of porosities of two porous baffles ($d/h = 1.0$)

Fig. 4.38 에서 Fig. 4.40 은 내부재가 수심의 중간지점까지 잠겨있을 때 탱크 벽면에서의 증폭비를 보여주고 있다. Fig. 4.38 에서 수치해석 결과를 살펴보면 운동주기가 약 0.47초 주변에서 공진현상이 두 번 생기는 것을 볼 수 있다. 짧은 주기 내에서 갑작스런 변화가 두 번 일어나므로 모형실험 결과로 공진현상을 정확히 확인할 수는 없었지만 이 부분을 제외하면 수치해석 결과는 모형실험 결과를 잘 따라가고 있음을 확인하였다. 공극율이 커지면 운동주기 약 0.47초에서 나타난 두 번의 공진 현상이 한 번으로 줄어들게 된다.

Fig. 4.41 은 공극율 변화에 따른 탱크 벽면에서 측정된 수위의 증폭비를 비교한 그림이다. 운동주기 약 0.47초 주변에서 공진으로 인해 생기는 증폭비는 공극율과 관계없이 비슷한 값을 가지지만 1.2초에서 생기는 공진현상은 공극율이 커질수록 상대적으로 큰 증폭비를 보인다. 또한 탱크 내 유체의 고유주기도 공극율에 따라 단 주기 영역으로 다소 이동하는 것을 확인할 수 있다.

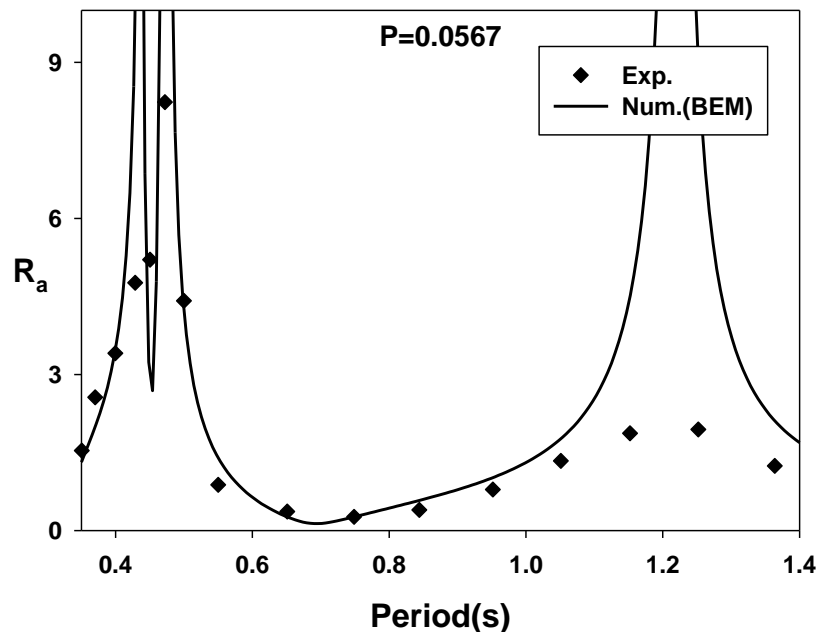


Fig. 4.38 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3\text{cm}$ ($P = 0.0567, d / h = 0.5$)

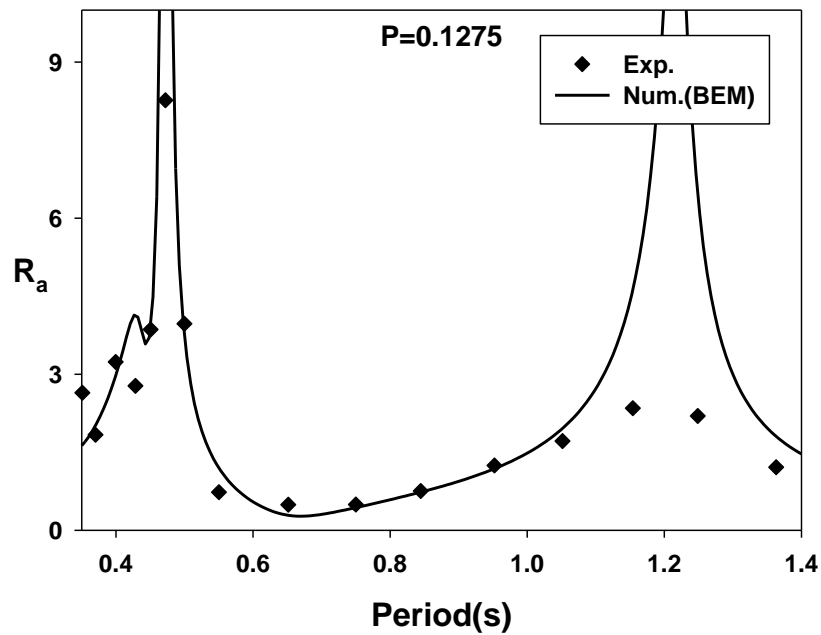


Fig. 4.39 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.1275, d / h = 0.5$)

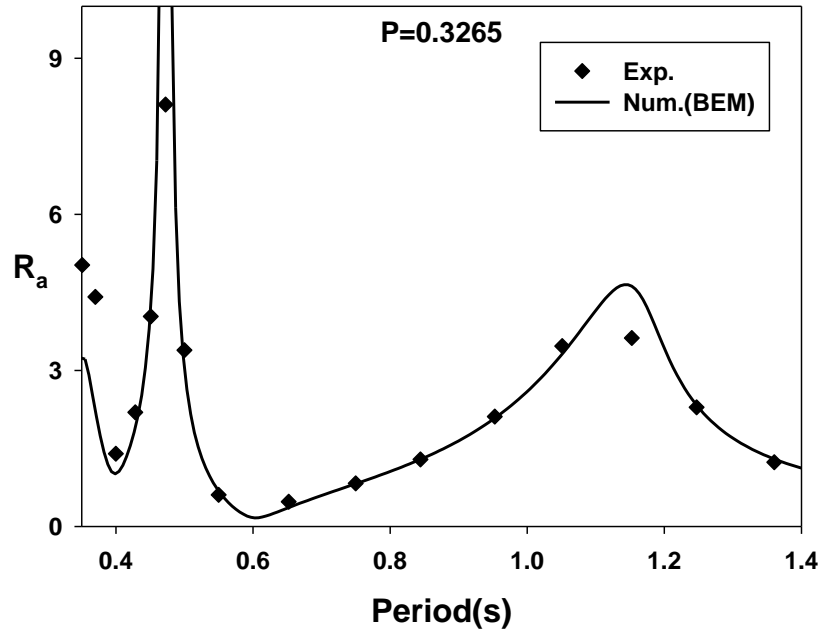


Fig. 4.40 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.3265, d / h = 0.5$)

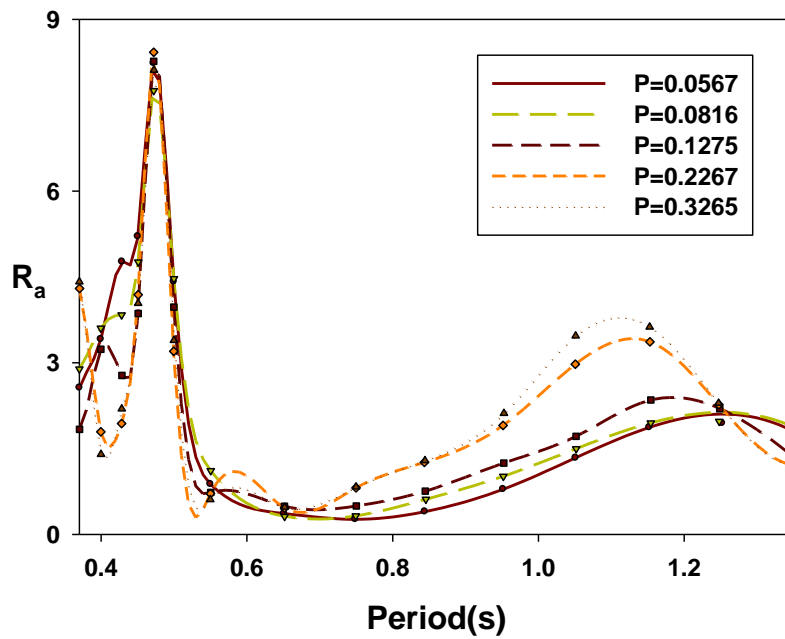


Fig. 4.41 Comparison of the amplification factor as function of porosities of two porous baffles ($d/h = 0.5$)

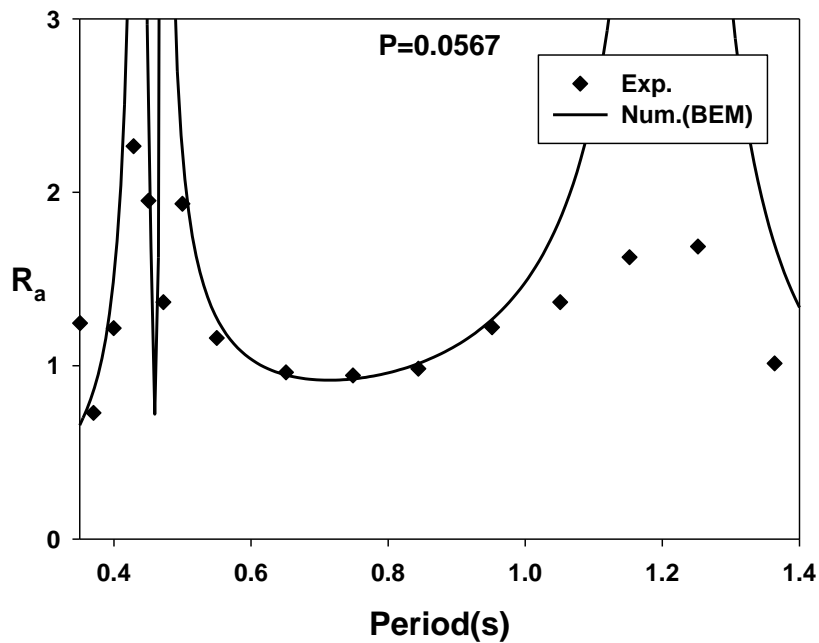


Fig. 4.42 Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3\text{cm}$ ($P = 0.0567, d/h = 0.5$)

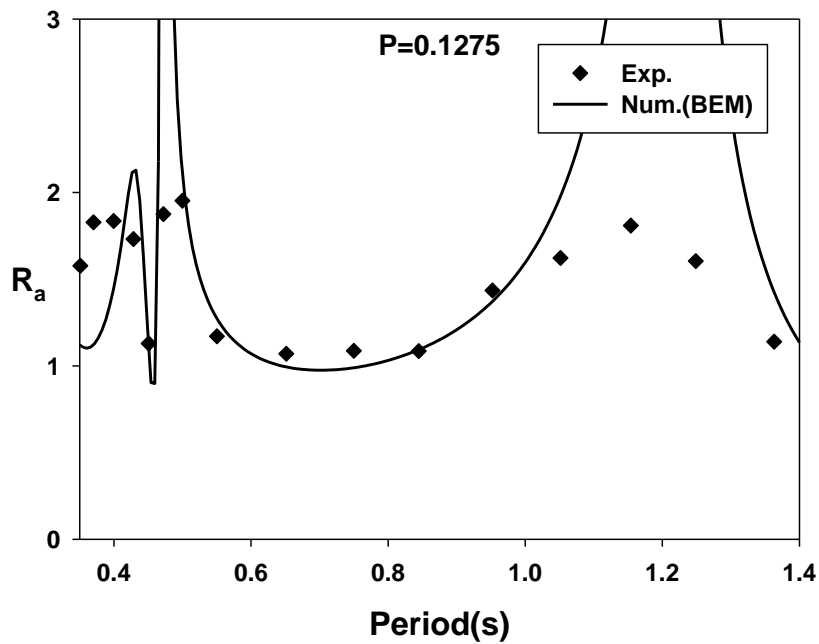


Fig. 4.43 Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.1275, d / h = 0.5$)

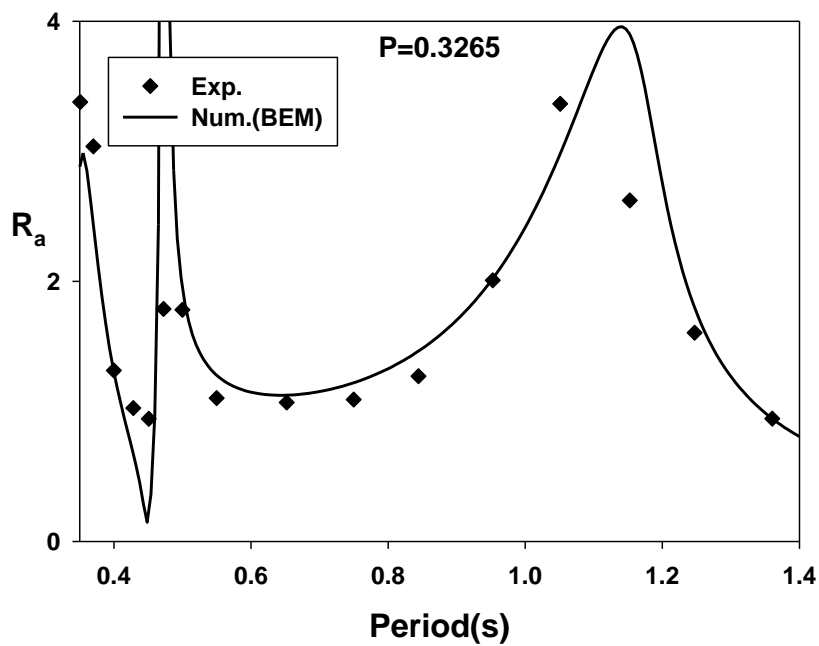


Fig. 4.44 Comparison of amplification ratio ($x = -0.6a$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm$ ($P = 0.3265, d / h = 0.5$)

Fig. 4.31 부터 Fig. 4.33 는 벽면에서 10cm 떨어진 지점에서의 증폭비를 보여주고 있다. 앞선 벽면에서의 증폭비 결과와 비슷한 경향을 보여주고 있다. Fig. 4.45 부터 Fig. 4.47 은 탱크 벽면에서의 압력을 운동주기에 따라 그렸다. 수치해석 결과에서 앞선 증폭비 결과와 같이 탱크의 운동주기 약 0.47초에서 두 번의 공진현상이 생겨 벽면에서의 압력이 급격히 커진다. 공극율이 커지면서 0.47초에서 일어나는 공진 현상은 하나로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4.48 은 모든 공극율 변화에 대한 압력을 나타낸 그림이다. 운동주기 약 0.47초에서 공진에 의한 압력 값은 공극율에 관계없이 비슷한 값을 보인다. 그러나 장 주기 영역인 약 1.1초에서 공진으로 인해 발생하는 압력은 증폭비 결과인 Fig. 4.41 과 같이 공극율이 커질수록 큰 압력을 나타내고 있으며 공진주기도 단 주기 영역으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이를 종합했을 때 공극율이 0.0816과 0.1275사이에 있는 서로 같은 내부재 2개를 탱크 바닥까지 잠기도록 설치할 경우 슬로싱 억제 효과가 우수하다고 할 수 있다.

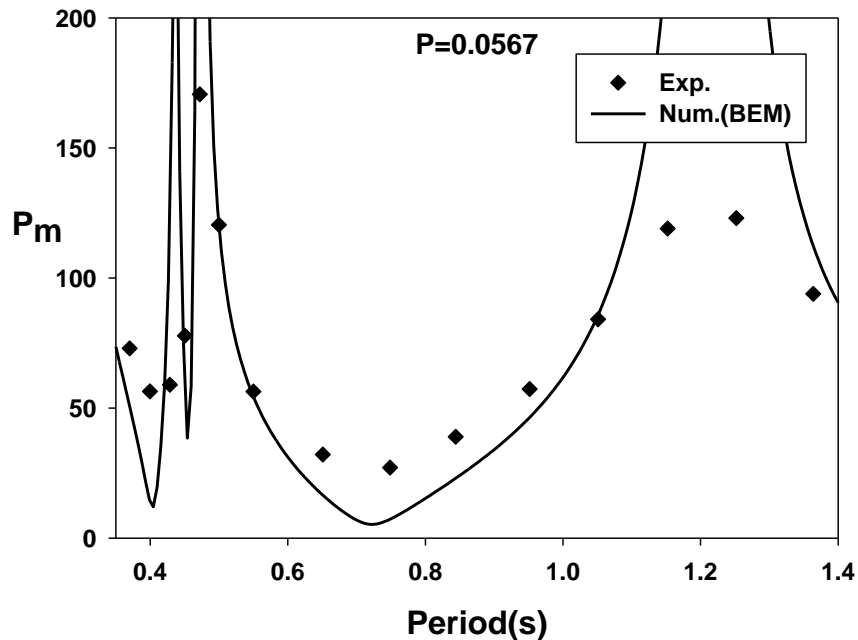


Fig. 4.45 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8\text{cm}$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3\text{cm}$ ($P = 0.0567, d/h = 0.5$)

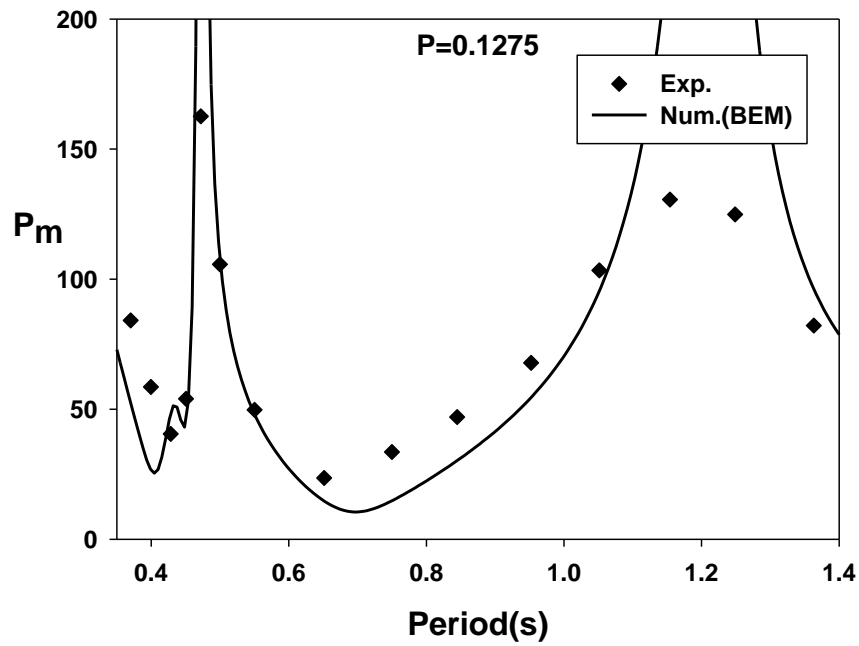


Fig. 4.46 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8 \text{ cm}$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3 \text{ cm}$ ($P = 0.1275, d/h = 0.5$)

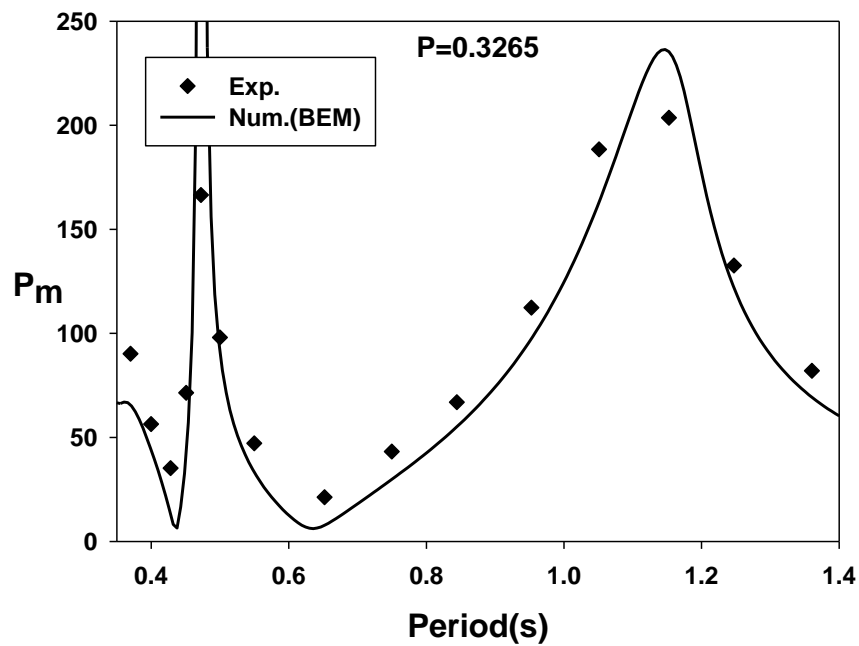


Fig. 4.47 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8 \text{ cm}$) between the experimental and numerical results for two porous baffles placed at $x = \pm 8.3 \text{ cm}$ ($P = 0.3265, d/h = 0.5$)

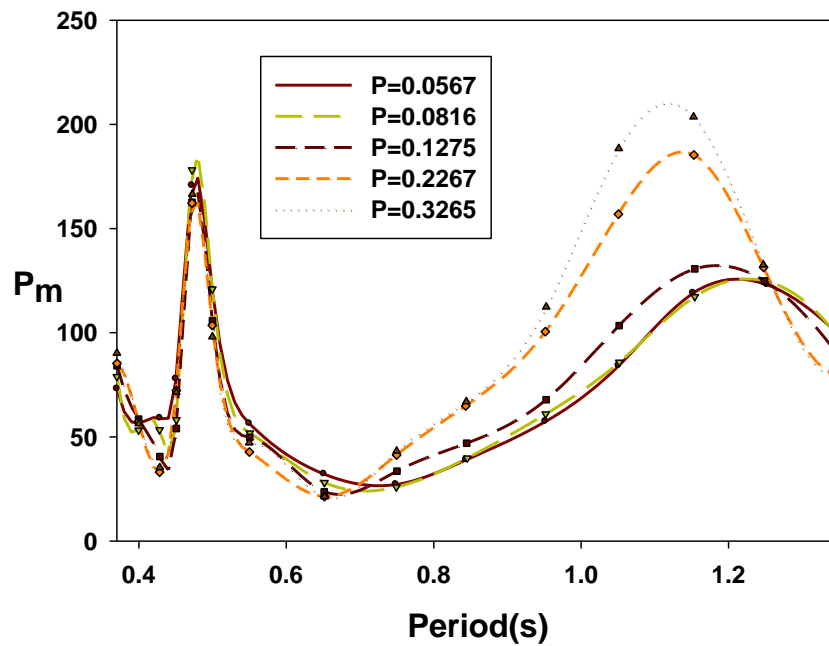


Fig. 4.48 Comparison of the pressure as function of porosities of two porous baffles ($d/h = 0.5$)

4.2.3 내부재 4개 실험

여기서는 4개의 내부재를 탱크 내에 배치하였을 때 수위 변화와 벽면에서의 압력을 측정하고 그 결과를 수치해석결과와 비교하였다. 먼저 모형실험에 사용한 내부재의 공극율은 2종류로 탱크 중앙과 ($x = \pm 8.3\text{cm}$) 바깥쪽에 ($x = \pm 18\text{cm}$) 서로 같은 공극율 2개씩 총 4개를 탱크 바닥까지 잠기도록 설치해서 모형실험을 수행하였다. 특히 모형실험 중 빨리 움직이는 탱크의 운동을 따라 내부 유체의 급격한 수위 변화와 함께 3차원적인 효과가 동반된 비선형적인 특성을 확인할 수 있었다. 앞서서와 마찬가지로 실험결과와 수치해석 결과가 정량적인 차이는 보이지만 정성적으로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.49 는 탱크 중앙부에 공극율이 0.2267인 내부재 2개를 설치하고 바깥쪽에 공극율이 0.1275인 내부재 2개를 설치한 경우에 대한 증폭비를 보여주고 있다. 탱크 내 유체영역이 내부재 4개로 나뉘어 유체의 고유주기가 작아져서 공진현상이 약 0.3초에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 공진

이후 탱크의 운동주기 약 0.4초에서 증폭비가 다시 증가하다가 줄어들어 0.6초에서 증폭비는 최소값을 갖고 0.6초 이후 다시 증폭비가 완만히 증가하는 것을 볼 수 있다. 실험 결과는 이전에 살펴본 내부재가 없는 순수한 탱크의 경우, 내부재를 1개와 2개를 설치한 경우에서 보였던 현상이 복합적으로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.50 은 중앙부의 내부재와 바깥쪽의 내부재를 서로 뒤 바꾼 경우의 증폭비를 나타낸다. Fig. 4.49 와 비슷한 경향을 보이지만 운동주기 약 0.4초에서의 증폭비가 더 큰 값을 보이고 운동주기 0.6초 이후 거의 일정한 값을 보이고 있다. 탱크의 운동주기가 짧은 경우 내부 유체가 탱크의 운동에 따라 급격히 움직이므로 내부재의 에너지 감쇠 효과를 충분히 받지 못한다. 그러나 탱크의 운동주기가 길어짐에 따라 유체가 정상류와 같이 충분한 시간동안 일정한 방향을 가지고 내부재를 통과하게 되어 에너지 감쇠 효과가 극대화 되어 슬로싱 억제 효과가 크게 나타날 수 있다.

다음은 같은 조건에 대하여 탱크 벽면에서의 압력을 나타내는 그림으로 Fig. 4.51 은 중앙부에 상대적으로 공극율이 큰 내부재를 배치한 경우이고 Fig. 4.52 는 그 반대로 중앙부에 공극율이 작은 내부재를 배치하였을 때의 압력을 그린 그림이다. 앞에서 수행한 실험 결과들과는 달리 내부재 4개 사용하는 경우 압력 곡선은 증폭비 곡선과 다른 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 증폭비의 경우 주기 0.2초에서 0.4초 사이에 공진현상이 관찰되는 반면 압력은 운동주기 0.2초에서 가장 큰 값을 갖고 이후 운동주기가 증가함에 따라 압력은 점차적으로 줄어들다가 주기 약 0.4초 이후 일정한 압력을 보인다. 단 주기에서 벽면에서의 압력이 큰 이유는 유체의 유동은 탱크의 운동주기가 짧을수록 급격해지고 비선형적인 특성이 두드러지는 것으로 설명할 수 있다.

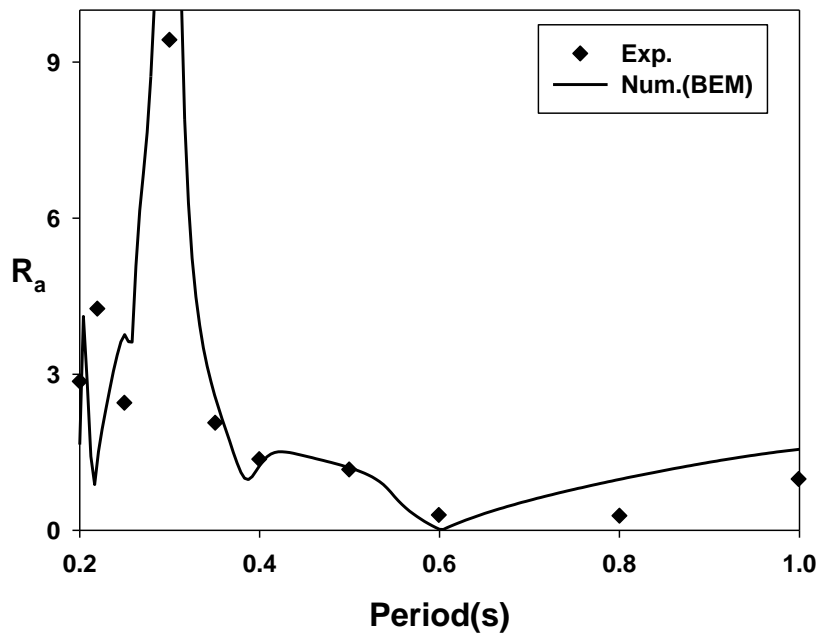


Fig. 4.49 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3\text{cm}, \pm 18\text{cm}$ ($P_{\text{inside}} = 0.2267, P_{\text{outside}} = 0.1275, d/h = 1.0$)

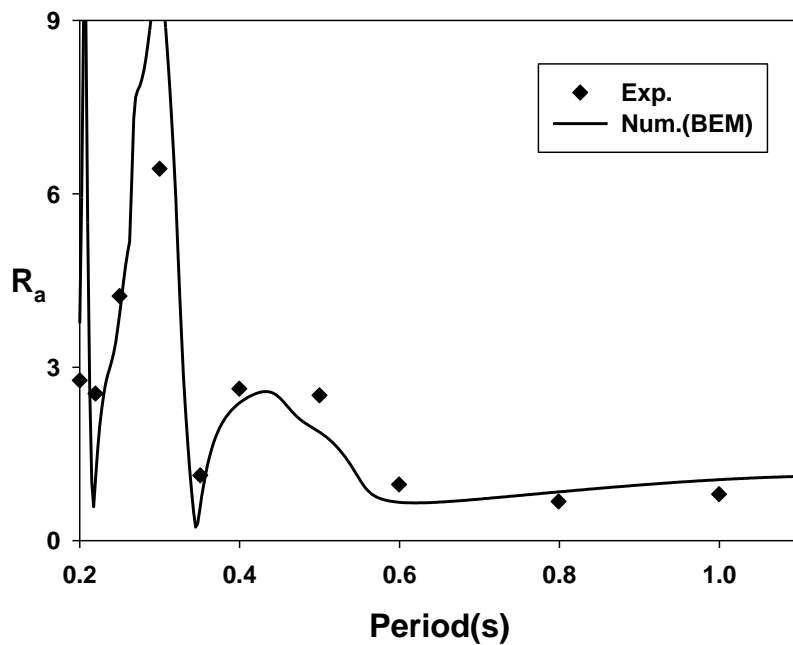


Fig. 4.50 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3\text{cm}, \pm 18\text{cm}$ ($P_{\text{inside}} = 0.1275, P_{\text{outside}} = 0.2267, d/h = 1.0$)

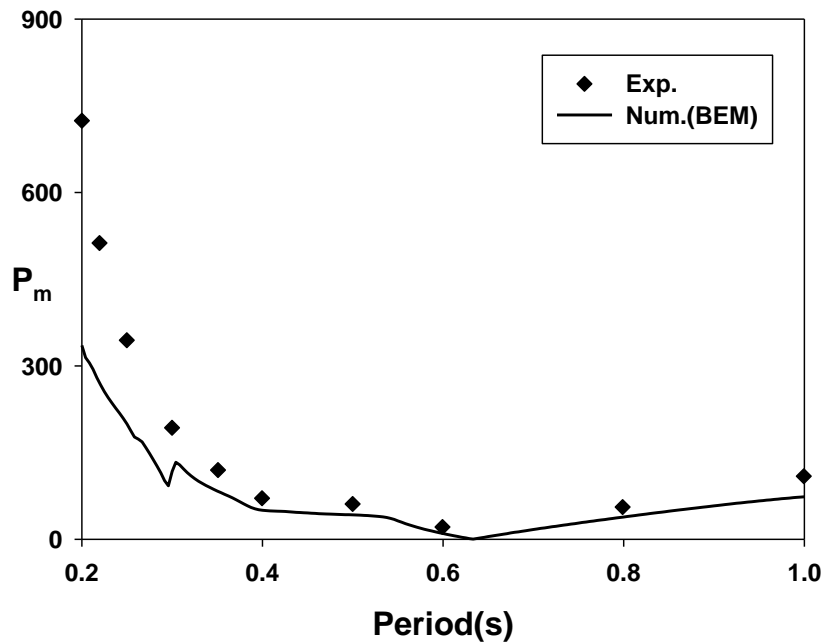


Fig. 4.51 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm, \pm 18cm$ ($P_{inside} = 0.2267, P_{outside} = 0.1275, d / h = 1.0$)

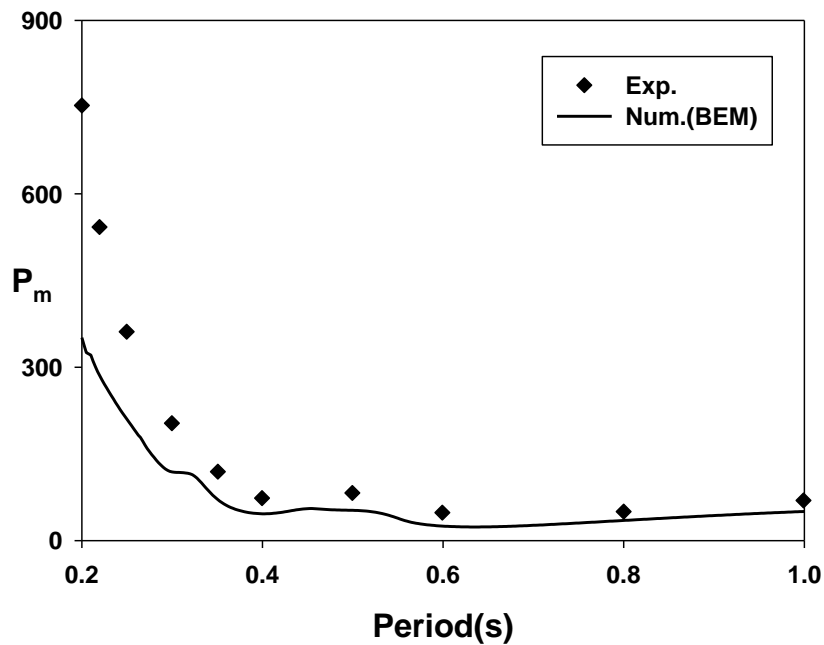


Fig. 4.52 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm, \pm 18cm$ ($P_{inside} = 0.1275, P_{outside} = 0.2267, d / h = 1.0$)

Fig. 4.53 과 Fig. 4.55 는 앞선 그림에서 내부재의 잠긴 깊이를 수심의 반인 5cm일 때 증폭비를 보여주고 있다. 탱크의 운동주기가 약 0.3초에서 공진현상을 보이고 약 0.5초에서 작은 봉우리가 나타나며 0.6초에서 최솟값을 갖는다. 바깥쪽에 공극율이 큰 내부재를 배치하였을 때 중앙부에 공극율이 큰 내부재를 배치하였을 때보다 0.5초에서 나타난 봉우리의 증폭비가 더 크다. 배치 변화에 따른 두 실험 모두 주기 0.6초 이후에 증폭비가 점차적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4.54 와 Fig. 4.56 은 같은 조건에 대하여 벽면에서 측정된 압력을 보여주고 있다. 운동주기가 0.2초일 때 가장 큰 압력을 보이고 운동주기 약 0.6초까지 점차적으로 감소하다가 0.6초 이후로 다시 압력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 앞선 경우와 달리 내부재 하부를 통하여 유체가 자유롭게 이동할 수 있기 때문에 내부재가 없는 순수한 탱크 모형실험에서 볼 수 있었던 주기 약 1.1초에서 증폭비의 최댓값이 나타날 것으로 예측되나 모형실험 주기 범위 밖에 있어서 1.1초에서 나타나는 공진현상은 확인하지 못하였다.

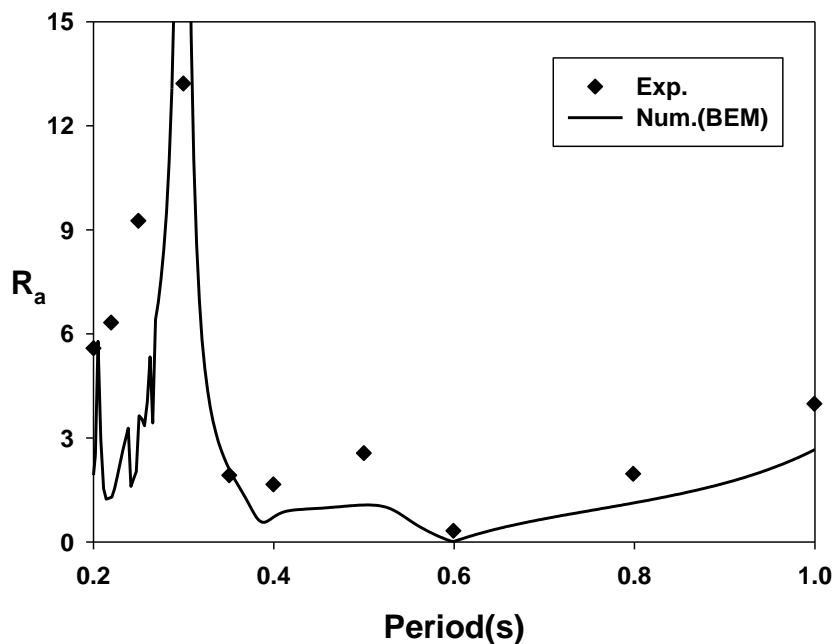


Fig. 4.53 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3\text{cm}, \pm 18\text{cm}$ ($P_{\text{inside}} = 0.2267, P_{\text{outside}} = 0.1275, d/h = 0.5$)

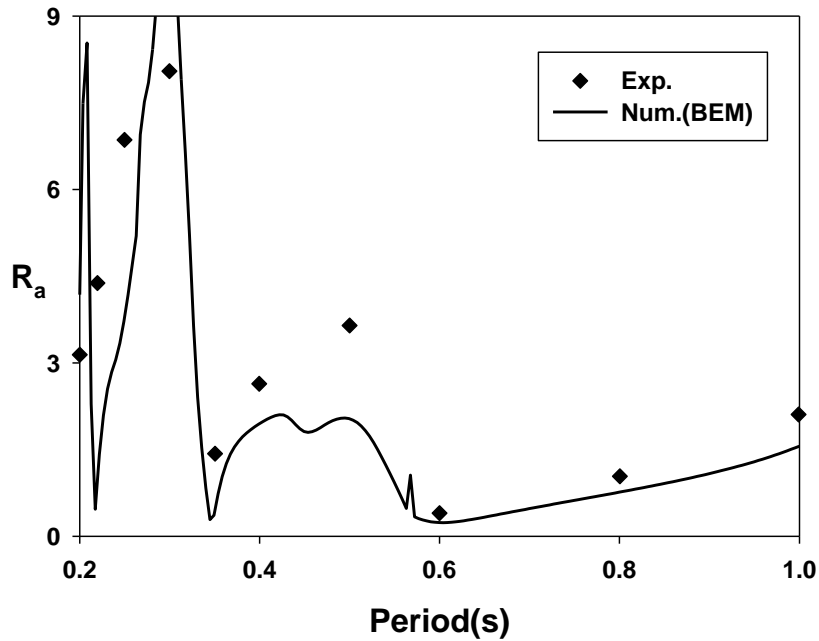


Fig. 4.54 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3\text{cm}, \pm 18\text{cm}$ ($P_{\text{inside}} = 0.1275, P_{\text{outside}} = 0.2267, d/h = 0.5$)

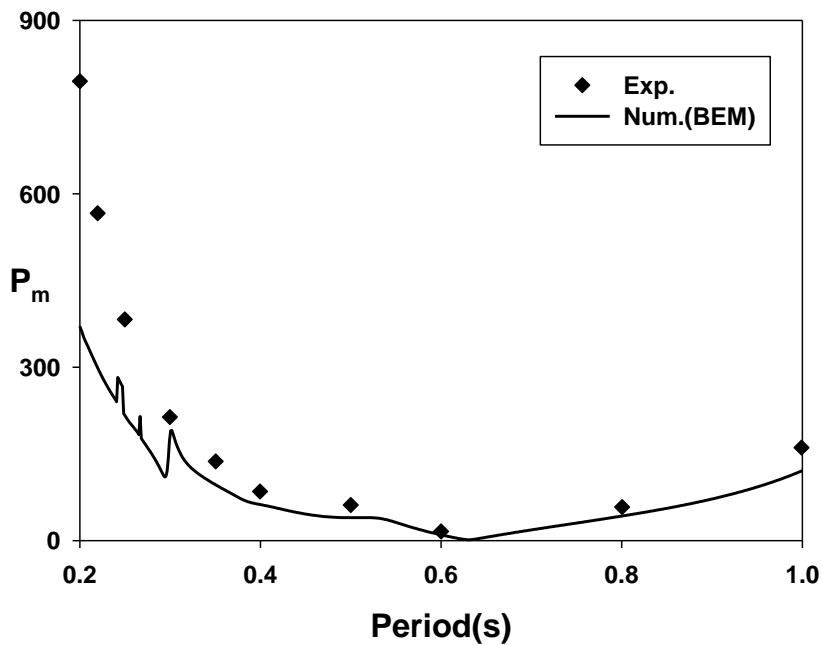


Fig. 4.55 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8\text{cm}$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3\text{cm}, \pm 18\text{cm}$ ($P_{\text{inside}} = 0.2267, P_{\text{outside}} = 0.1275, d/h = 0.5$)

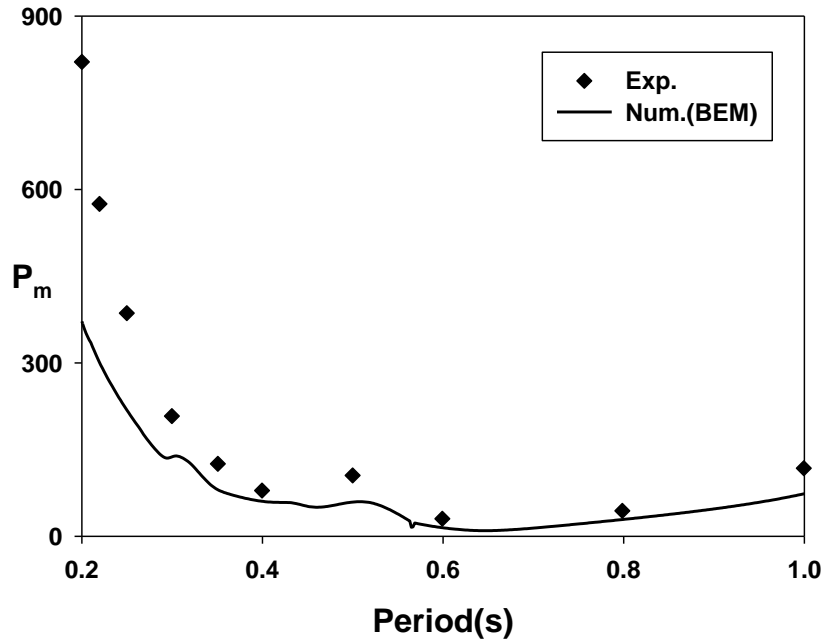


Fig. 4.56 Comparison of pressure ($x = -a, z = -8cm$) between the experimental and numerical results for four porous baffles placed at $x = \pm 8.3cm, \pm 18cm$ ($P_{inside} = 0.1275, P_{outside} = 0.2267, d/h = 0.5$)

4.2.4 탱크의 운동진폭 변화 실험

본 논문에 사용한 수치해석 모델은 투과성 내부재 전후의 압력차는 내부재에서의 속도에 제곱에 비례한다는 비선형 방정식을 사용하였고, 이를 풀기 위하여 준선형화 과정을 통하여 해를 구하였다. 그러나 선형 자유표면 경계조건식을 사용하였기 때문에 자유표면의 수위의 비선형 특성을 제대로 구현할 수 없다는 한계가 있다. 모형실험에서도 동일한 실험조건이라도 탱크의 운동진폭이 커지면 내부 유체의 비선형성이 더욱 증가하게 된다. 따라서 비선형 상호작용에 의하여 입력주파수 외에 고주파수(High frequency) 항들이 추가적으로 나타난다. 본 연구에서는 선형포텐셜이론을 적용하여 수치해석을 수행하였기 때문에 탱크의 운동진폭이 작을수록 수치해석 결과와 모형실험 결과는 잘 일치할 것이다. 그러나 탱크 운동진폭이 커지면 비선형성이 증가하여 모형실험 결과가 수치해석 결과와 어느 정도 부합하는지 확인할 필요가 있다.

모형실험은 탱크 중앙부에 공극율 0.1275인 내부재 1개를 바닥까지 설치한 후 탱크의 운동진폭을 0.1 ~ 0.4cm까지 변경하면서 증폭비를 구하여 서로 비교하였다. Fig. 4.57 은 탱크의 운동진폭 변화에 따른 탱크 벽면에서의 증폭비 결과를 나타내고 있다. 전체적으로 비슷한 경향을 보이고 있지만 탱크의 운동진폭이 작아질수록 증폭비는 줄어들며, 탱크 내 유체의 고유주기도 운동진폭에 따라 변하는 것을 확인할 수 있다. 탱크의 운동진폭에 따른 비선형성을 확인하기 위하여 운동진폭 0.2cm와 0.4cm에 대한 결과를 비교해 보았다. Fig. 4.58 과 Fig. 4.60 은 운동진폭이 0.2cm와 0.4cm이고 주기가 0.8초인 경우에 대한 시계열 데이터 결과이고 Fig. 4.59 와 Fig. 4.61 은 진폭스펙트럼 결과이다. 시계열 데이터를 보면 두 그래프 모두 정현파 형태를 나타내지 않는 것을 알 수 있다. 이는 진폭스펙트럼 결과를 통해 입력주파수인 ω 항뿐만 아니라 2ω 에서도 특정 값을 갖는 것으로 설명할 수 있다. 그리고 그래프를 통해 운동진폭이 커질수록 비선형성이 더 커진다는 사실을 확인할 수 있다.

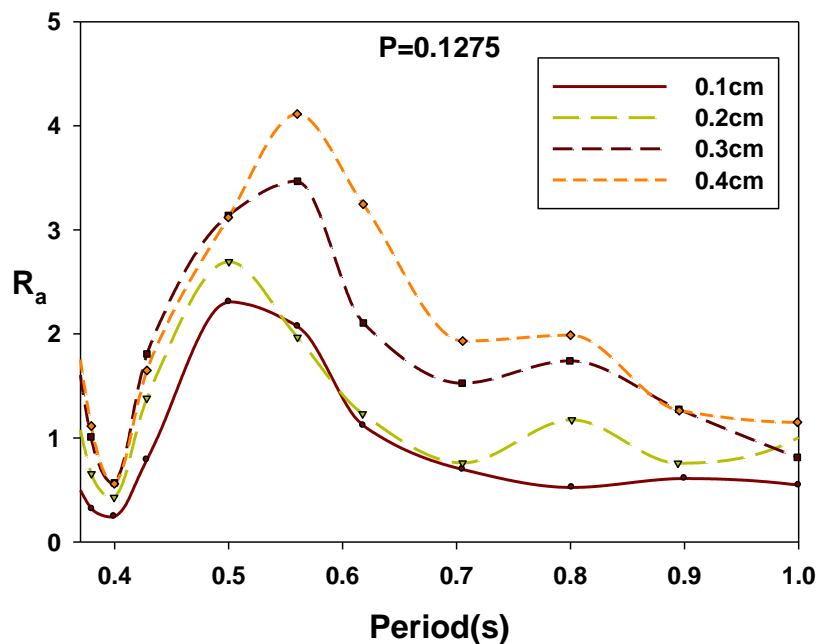


Fig. 4.57 Comparison of amplification ratio ($x = -a$) according to the motion amplitudes of a tank for single porous baffle placed at the center ($P = 0.1275, d/h = 1.0$)

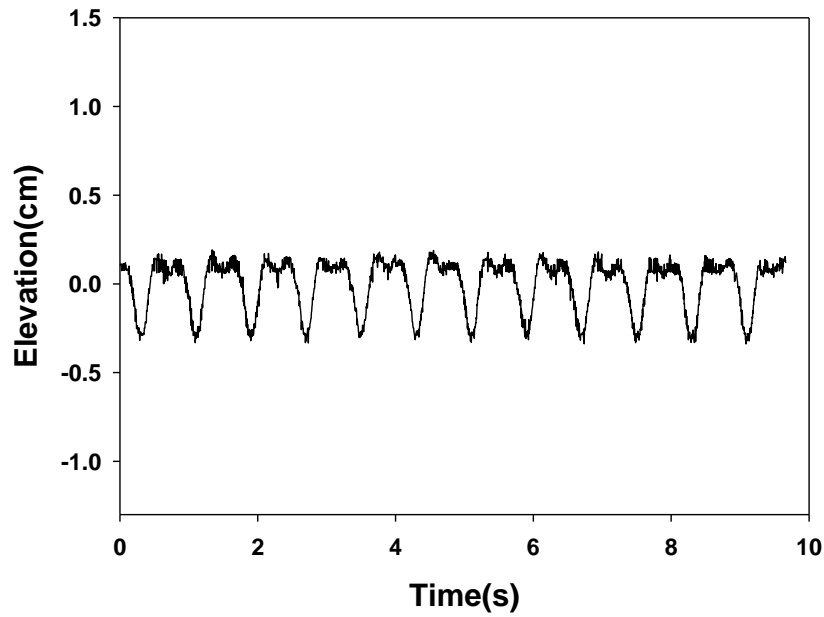


Fig. 4.58 Time series of the wave elevation ($x = -a$) for single porous baffle placed at center ($P = 0.1275, d/h = 1.0, \text{amplitude} : 0.2\text{cm}, \text{period} : 0.8\text{s}$)

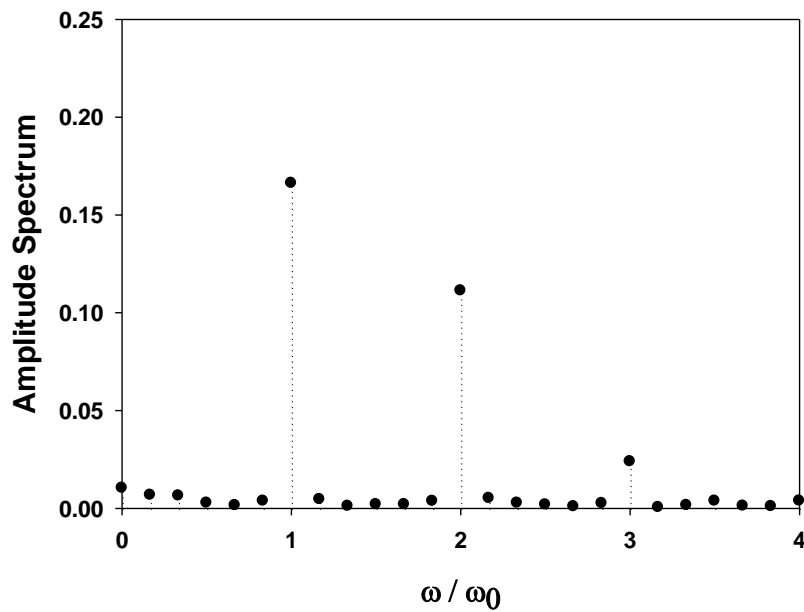


Fig. 4.59 Amplitude spectrum of wave elevation for single porous baffle placed at center ($P = 0.1275, d/h = 1.0, \text{amplitude} : 0.2\text{cm}, \text{period} : 0.8\text{s}$)

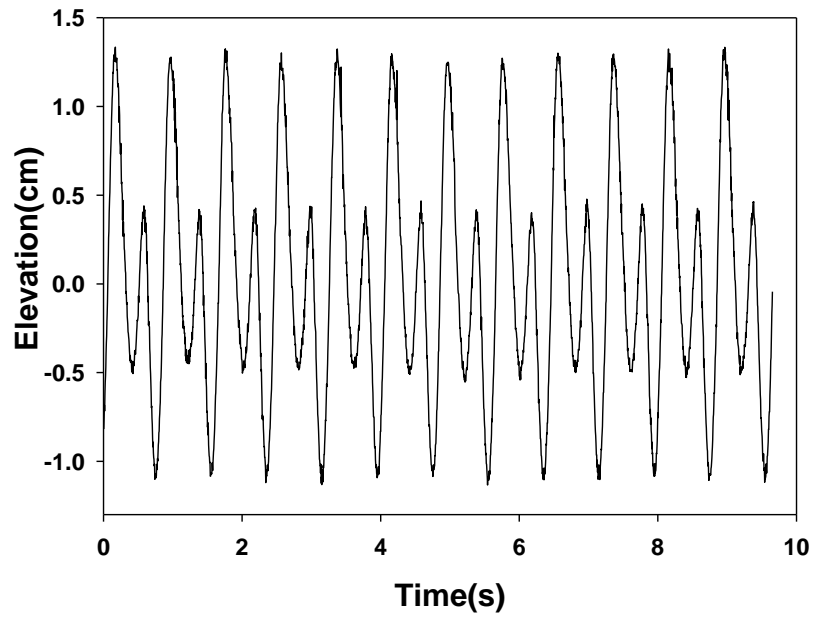


Fig. 4.60 Time series of the wave elevation ($x = -a$) for single porous baffle placed at center ($P = 0.1275, d/h = 1.0, \text{amplitude} : 0.4\text{cm}, \text{period} : 0.8\text{s}$)

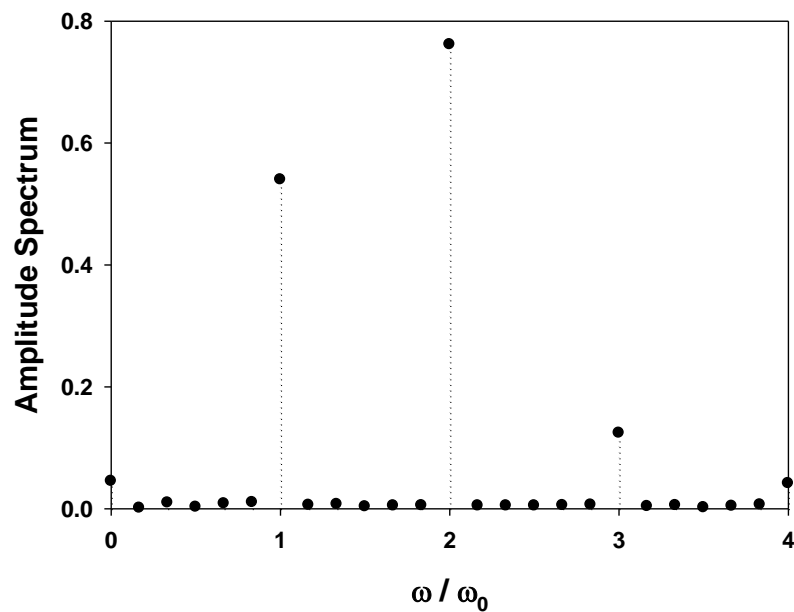


Fig. 4.61 Amplitude spectrum of wave elevation for single porous baffle placed at center ($P = 0.1275, d/h = 1.0, \text{amplitude} : 0.4\text{cm}, \text{period} : 0.8\text{s}$)

4.3 슬릿판 실험

4.3.1 내부재 1개 실험

슬릿판에 대한 수치해석 결과와 모형실험 결과가 타공판과 같이 정성적으로 비슷한 경향을 보이기 때문에 4.3절에서는 수치해석 결과와 모형실험 결과를 비교하는 부분은 제외하고 공극율에 따른 증폭비와 압력에 대한 실험 결과에 대해서만 비교하도록 하겠다. Fig. 4.62 는 공극율 변화에 따른 탱크 벽면에서의 증폭비와 압력을 비교한 그림이다. 먼저 공극율이 0.0964인 경우 운동주기 약 0.61초에서 공진현상이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 공극율이 큰 다른 두 슬릿판은 약 0.47초에서 공진현상이 일어나고 이후 약 1.1초에서 비록 작은 값이지만 다시 한 번 최대값을 갖는다. 내부재 종류와 사용한 공극율이 다르지만 Fig. 4.8 과 비교하였을 때 공극율이 작으면 운동주기 약 0.61초에서 공진현상이 일어나고 공극율이 커지면 운동주기 약 0.47초와 1.1초에서 공진현상이 일어나는 것으로 공극율에 따른 슬로싱 응답은 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 하지만 타공판과는 다르게 공진주기에서 공극율이 0.1968인 내부재가 다른 두 공극율 보다 슬로싱 억제 성능이 우수하다는 것을 알 수 있다. 증폭비 곡선과 마찬가지로 벽면에서의 압력도 비슷한 경향을 보여주고 있다. 증폭비와 압력에 대한 실험 결과를 통해 공극율 0.1968인 슬릿판이 슬로싱 억제 성능이 우수한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 슬로싱 억제 성능이 우수한 공극율은 0.1과 0.2사이에 있다는 것을 짐작할 수 있다.

Fig. 4.63 은 슬릿판의 잠긴 깊이가 5cm 일 때의 증폭비와 압력을 나타낸다. 자유표면 부분은 내부재로 막혀있지만 내부재 아래 부분은 개방되어 탱크 내 유체가 자유롭게 움직일 수 있기 때문에 순수한 탱크에서 보였던 현상을 확인할 수 있었다. Fig. 4.19 와 Fig. 4.26 을 통해 내부재의 설치 위치가 수심의 중간 지점인 경우 종류에 관계없이 증폭비와 압력에 대한 결과가 모두 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

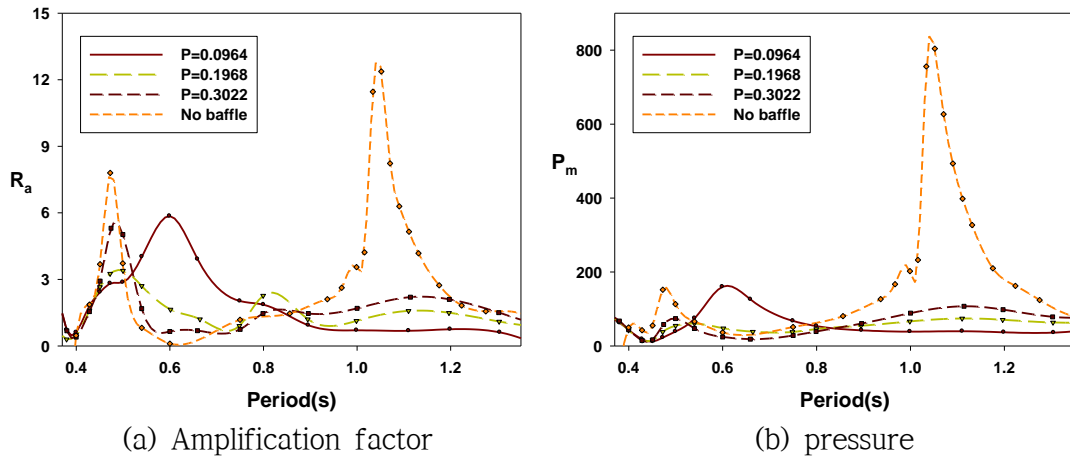


Fig. 4.62 Comparison of the amplification factor and measured pressure as function of porosities of porous baffle ($d/h = 1.0$)

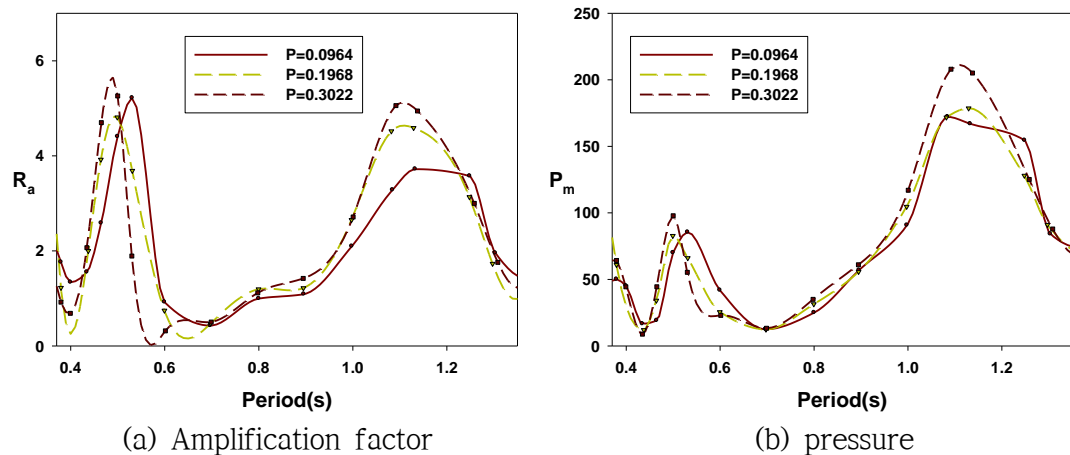


Fig. 4.63 Comparison of the amplification factor and measured pressure as function of porosities of porous baffle ($d/h = 0.5$)

4.3.2 내부재 2개 실험

Fig. 4.64 는 공극율이 같은 내부재 2개를 탱크 바닥에 설치한 후 탱크 벽면에서의 증폭비와 압력을 나타낸다. 타공판 실험결과와 같이 모든 공극율에서 운동주기 약 0.47초에 비슷한 크기로 공진현상이 보이고 공극율이 큰 경우 주기 약 0.7초 이후에 증폭비가 증가해서 다시 한 번 최댓값을 갖는 것을 확인 할 수

있다.

Fig. 4.65 는 내부재 2개의 잠긴 깊이가 5cm 일 때의 증폭비와 압력을 나타낸다. 모든 공극율에서 주기 약 0.47초에 공진현상을 보이고 크기가 비슷하다. 그리고 내부재 하단에 개방된 영역으로 인해 주기 약 0.6초 이후로 크기가 다시 증가하고 약 1.1초에 다시 한 번 최대값을 갖는다.

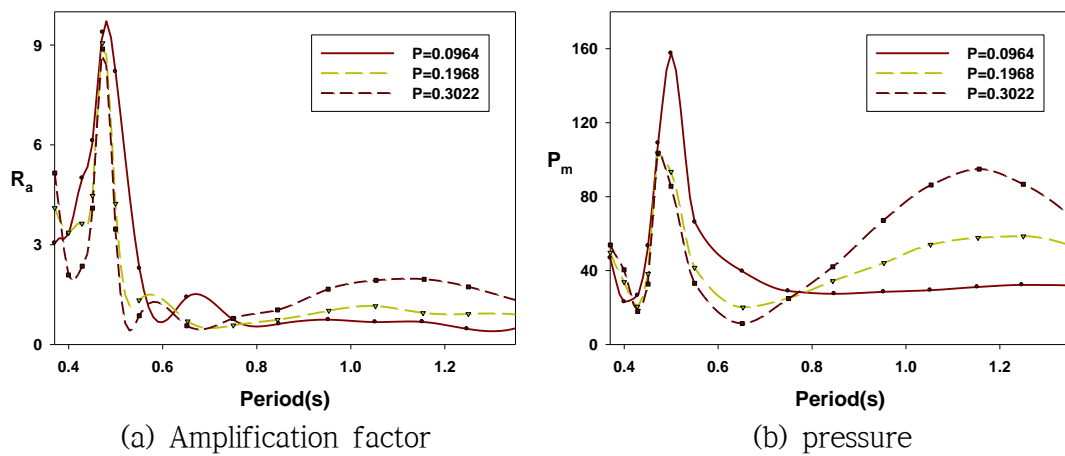


Fig. 4.64 Comparison of the amplification factor and measured pressure as function of porosities of two porous baffles ($d/h = 1.0$)

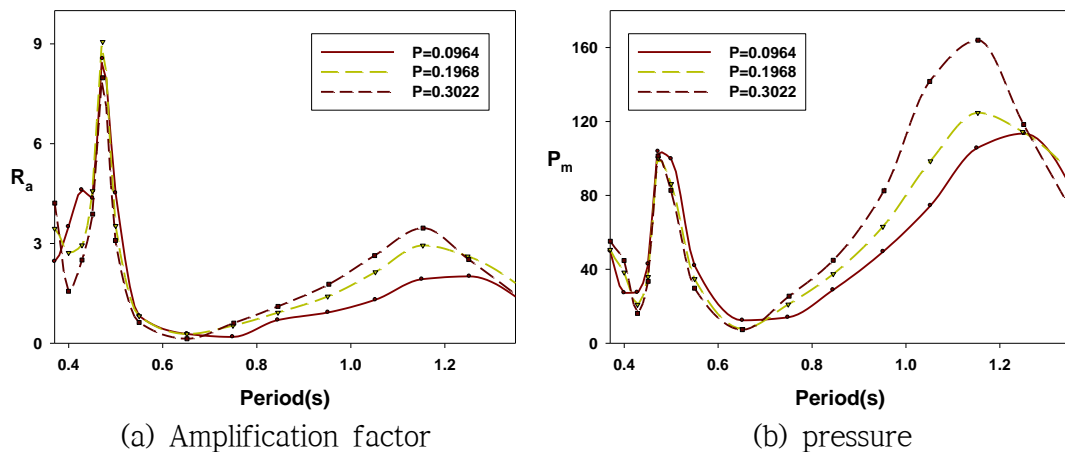


Fig. 4.65 Comparison of the amplification factor and measured pressure as function of porosities of two porous baffles ($d/h = 0.5$)

제 5 장

결론 및 향후 연구

식 (3.1)에서 탱크 내 유체의 고유주기는 탱크의 길이와 물의 높이에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이를 통해 탱크 외부에서 오는 외력에 대한 정보에 따라 유체의 적재용량과 탱크의 길이를 조절해서 탱크 내 유체의 고유주기를 변경하는 것도 슬로싱에 의한 피해를 줄이는 방법 중 하나라고 볼 수 있다. 하지만 위와 같은 방법으로 탱크에 작용하는 외력의 고유주기를 피했다 하더라도 한 번 공진현상이 생기게 되면 그에 따른 증폭비와 압력은 Fig. 4.1 과 Fig. 4.2 와 같이 급격히 증가할 것이다. 따라서 슬로싱으로 인하여 탱크 내벽에 작용하는 증폭비와 압력을 억제하는 방법을 모색하는 것이 효과적이다.

본 논문에서는 슬로싱을 억제하기 위한 방법으로 투과성 내부재를 사용하고 내부재의 종류, 공극율, 설치 개수 및 방법에 따른 모형실험을 수행하였다. 모형실험을 통해 측정지점에서의 수위와 압력을 측정한 후 증폭비와 압력을 계산하여 경계요소법을 이용한 수치해석 결과와 비교하였다. 측정지점에서의 증폭비와 압력에 대하여 모형실험 결과와 수치해석 결과가 정량적인 차이는 보이나 정성적으로 잘 일치하는 것을 통해 비록 선형이론에 기반한 해석방법 이지만 내부재의 설계조건에 따른 탱크 내 슬로싱 현상을 해석할 수 있다는 평가는 내릴 수 있었다.

내부재가 없는 순수한 탱크의 경우 공진주기에서 유체의 유동이 급격히 증폭하고 탱크 내벽에 작용하는 압력이 커지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4.8 과 Fig. 4.15 를 통해 내부재 1개를 탱크 바닥까지 잠기도록 설치할 경우 탱크 내 유체의 고유주기가 변하고 특히 공진현상으로 인해 생기는 수위와 탱크 내벽에 작용하는 압력이 크게 감소하는 것으로 내부재의 효과를 확인할 수 있었다. 그리고 탱크 벽면에서의 증폭비를 따라 압력 결과가 비슷한 경향을

나타내었다. 투과성 내부재의 공극율이 작으면 불투과성 내부재와 비슷한 고유주기를 갖지만 공극율이 커질수록 개방되는 부분이 많아져서 내부재가 없는 순수한 탱크에서 보였던 현상이 나타났다. 모형실험 결과에서 타공판과 슬릿판 각각 공극율이 0.1과 0.2에 가까운 내부재가 슬로싱 억제 효과가 크다는 것을 확인하였다. 이를 통해 슬로싱 억제 성능이 우수한 내부재의 공극율이 0.1에서 0.2사이에 있다는 것을 짐작할 수 있다.

내부재 1개를 5cm 잠기도록 설치할 경우 증폭비와 압력 곡선이 공극율에 상관없이 비슷한 경향을 보였다. 공극율이 작아도 내부재 하부가 완전히 개방되어있기 때문에 운동주기 약 0.47초와 1.1초에서 공진현상이 일어나는 내부재가 없는 순수한 탱크에 대한 결과와 유사한 현상을 보였다. 공극율에 상관없이 유체의 고유주기가 모두 비슷한 경향을 나타내고 1차 고유주기에서의 증폭비와 압력 또한 공극율에 따라 큰 차이가 없었다. 하지만 탱크의 운동주기가 약 1.1초 주변에서 생기는 공진현상에 대해서는 공극율이 커질수록 탱크 벽에 작용하는 증폭비와 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

내부재 2개를 바닥에 설치할 경우 공진주기가 약 0.47초로 작아지고 공극율이 커질수록 약 1.1초에서 다시 한 번 공진현상이 일어난다. 공진주기에서 증폭비와 압력은 내부재 1개를 설치한 경우보다 더 커졌으나 상대적으로 좁은 주기영역에서 일어나고 공진주기를 벗어난 영역에서는 증폭비와 압력에 큰 차이가 없는 것을 알 수 있었다. 따라서 증폭비에는 큰 차이가 없지만 공진주기 영역을 제외하면 내부재 1개 설치할 때보다 상대적으로 넓은 주기 범위 안에서 슬로싱 억제 효과를 확인할 수 있다.

내부재를 4개 설치할 경우 탱크 내 유체의 고유주기가 약 0.3초로 작아지고 모형실험을 통해 결과를 확인하기 위하여 탱크의 운동주기가 작은 영역을 포함해서 실험하기 때문에 슬로싱 현상이 빠른 유체 유동을 동반한 3차원적인 특성과 복합적으로 나타나는 것을 확인하였다. 내부재를 4개 설치하였지만 주기 약 0.3초에서 공진현상에 의해 증폭비와 압력이 크게 증폭하고 탱크가 빨리 움직이기 때문에 탱크 내 유체가 내부재의 영향을 충분히 받지 못한다는 것을 그래프를 통해 확인할 수 있었다. 그리고 압력의 경우 운동주기가 짧을수록 큰

압력 값이 확인된다. 이는 빠른 탱크의 운동속도에 따라 유체가 반응하여 탱크 벽면에 가해지는 압력이 커지는 것으로 사료된다. 탱크의 운동주기가 길어질수록 증폭비와 압력 곡선이 점차적으로 줄어들지만 내부재 1개를 설치한 경우에 대한 결과와 비교해보면 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 내부재의 개수 증가에 따른 슬로싱 억제 효과는 미비한 것으로 평가된다.

위 결과들을 종합하여 경제적인 측면과 슬로싱 억제 효율을 고려하였을 때 내부재의 종류에 관계없이 공극율이 약 0.1에서 0.2사이에 있는 내부재 1개를 바닥까지 잠גיע 설치하는 것이 어떤 환경에도 우수한 슬로싱 억제 성능을 보인다고 제시할 수 있다. 하지만 외력의 운동주기가 약 0.6초 주변에 밀집해 있는 특별한 경우 공극율이 0.0816과 0.1275 사이에 있는 내부재 2개를 바닥까지 잠גיע 설치하는 것이 더 좋은 슬로싱 억제 성능을 보인다. 따라서 탱크에 작용하는 주변 환경의 외력을 고려하여 적절한 설계변수를 선정해야 한다.

지금까지 직립형 투과성 내부재의 종류와 공극율, 개수 및 배치방법에 따른 슬로싱 현상을 다루어보았다. 모형실험과 수치해석을 통해 슬로싱 억제 현상을 확인하였으나 정확한 평가를 위해서는 다양한 실험조건에 대해 확인할 필요가 있다. 추후 타공판과 슬릿판의 공극율을 동일하게 하고 불투과성 내부재를 포함해서 내부재 종류에 따른 영향을 확인하고 슬로싱 억제 성능이 우수하다고 평가된 공극율(0.1~0.2) 기준으로 추가적으로 공극율을 선정해서 슬로싱 현상을 억제하는 최적의 공극율을 찾고자 한다. 그리고 수평형 투과성 내부재를 설치하여 내부재의 설계변수에 따라 생기는 슬로싱 억제 효과를 확인하고자 한다. 마지막으로 수평운동뿐만 아니라 회전운동(Rolling)을 하는 탱크 내 슬로싱 현상을 다루고 더 나아가 수평운동과 회전운동이 복합적으로 일어나는 탱크 내 슬로싱 현상을 확인하고자 한다.

참고문헌

- 곽영균, 고성호, 2003. 사각형 탱크 내에서의 2 차원 슬로싱에 대한 전산유체역학적 연구. 대한기계학회논문집, 제 27 권 제 8 호, 1142-1149.
- 김광선, 최주열, 조대환, 2009. 장방형탱크 내부 슬로싱 현상에 관한 PIV 적용에 관한 연구. 해양환경안전학회 춘계학술발표회, 85-86.
- 김용환, 안양준, 김경환, 김상엽, 2012. 슬로싱 실험동 장비 구축 및 실험 현황. 대한조선학회지, 제49권 제1호, 1-12.
- 김지웅, 김재한, 김상엽, 김용환, 2014. PIV 를 이용한 슬로싱 유동 계측. 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 1858-1862.
- 남정우, 김경성, 황성철, 허재경, 박종천, Moo-Hyun Kim, 2012. 플로터를 이용한 슬로싱 충격하중 저감효과가 선체운동에 미치는 영향. 한국해양공학회지, 제26권 제4호, 50-56.
- 박기진, 윤성호, 2003. 배플을 적용한 액체연료탱크 내의 슬로싱 억제 기법 연구. 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, 917-920.
- 신장용, 최경식, 강신영, 2005. 내부재가 설치된 직운면체 화물창 내의 Sloshing 고유주기 산정. 한국해양공학회지, 제 19 권 제 6 호, 16-21.
- 양경규, 김지웅, 김용환, 2014. 모형실험과 수치해석을 통한 슬로싱 충격 현상에 대한 연구 : PIV vs CFD. 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 1025-1032
- 윤보현, 윤준규, 임종한, 2010. 배플을 적용한 Cargo 용 연료탱크 내부의 슬로싱 저감연구. 한국마린엔지니어링학회지, 제 34 권 제 8 호, 1074-1083.
- 이홍우, 조진래, 2005. 격막 설치에 따른 비선형 슬로싱 특성연구. 대한기계학회논문집, 제 29 권 제 11 호, 1455-1462.
- 조일형, 2015. 투과성 내부재가 설치된 사각형 탱크내의 슬로싱 해석. 한국해양공학회지, 제29권 제1호, 1-8.
- 지영무, 신영섭, 박준상, 현재민, 2011. 사각용기의 슬로싱 유동에 관한 연구. 대한기계학회논문집, 제 35 권 제 6 호, 617-624.

-
- 하민호, 2013. 내부 액체 슬로싱 현상을 이용한 사각형 형태의 부유체의 Surge/Pitch 운동 저감에 관한 수치적 고찰. 학위논문
- Cho, I.H., Kim, M.H., 2008. Wave absorbing system using inclined perforated plates. *Journal of Fluid Mechanics*, 608, 1-20.
- Faltinsen, O.M., 1974. A Nonlinear Theory of Sloshing in Rectangular tanks. *Journal of Ship Research*, Vol 18, 321-342.
- Hwang, S.C., Lee, B.H., Park, J.C., Sung, H.G., 2010. Particle-based Simulation for Sloshing in a Rectangular Tank. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24(5), 31-38.
- Mei, C.C., 1989. *The Applied dynamics of Ocean Surface Waves*. Advanced Series on Ocean Engineering. 1, World Scientific, Singapore.
- Ning, D.Z., Song, W.H., Liu, Y.L., Teng, B., 2012. A Boundary Element Investigation of Liquid Sloshing in Coupled Horizontal and Vertical Excitation. *Journal of Applied Mathematics*, Article ID 340640, 1-20.
- Ohira, Y., Sawada, T., Tada, M., 1999. Sloshing Behavior of A Magnetic Fluid in A Cylindrical Container. 2nd International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, Villigen Switzerland, 37-40.
- Saga, T., Hu, H., Kobayashi, T., Segawa, S., Taniguchi, N., Nagoshi, M., Higashiyama, T., Okamoto, K., 1999. A Comparative Study of the PIV and LDV Measurements on a Self-induced Sloshing Flow. *Proceedings of 3rd International Workshop on PIV*, Santa Barbara USA.
- Sawada, T., Kikura, H., Takeda, Y., Tanahashi, T., 1996. UVP Measurement on Magnetic Fluid Sloshing. 1st International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, Villigen Switzerland, 67-70.

Wang, Wei, Xiong, Yeping, 2014. Minimising the Sloshing Impact in Membrane LNG Tank Using a Baffle. Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, Porto Portugal, 3171-3177.

감사의 글

그 동안 많은 도움을 받아 탈없이 학위논문을 작성할 수 있었기에 도움을 주신 모든 분들께 감사의 말씀을 전하고자 합니다. 가장 먼저 저에게 학문의 즐거움을 가르쳐 주신 조일형 교수님께 감사하다는 말을 하고 싶습니다. 어리숙하고 모자라서 가르쳐 주셔도 항상 부족했던 저를 걱정해주시고 일을 잘 해나갈 수 있도록 다독이시고 이끌어주셔도 많이 부족하지만 여기까지 올 수 있었습니다. 교수님께 받은 은혜에 보답할 수 있도록 최선을 다해 노력하도록 하겠습니다. 그리고 어려운 수업을 쉽게 가르쳐 주셔서 힘들어도 도전하는 의욕을 만들어주셨던 배진호 교수님 바쁜 와중에도 심사위원장을 맡아주셔서 감사합니다. 학부 때 음향학의 맛을 가르쳐주시고 제 고민 상담을 들어주셨던 팽동국 교수님, 학과의 장으로서 학과와 학생들에 의견을 들어주시고 걱정하셨던 이종현 교수님, 항상 학생들의 편의를 봐주시고 해양공학을 쉽고 재미있게 가르쳐주셨던 배운혁 교수님께 감사의 말씀을 전합니다. 교수님들 밑에서 다양한 분야를 접하고 많은 것을 배울 수 있어서 학과에 잘 왔다고 생각합니다.

그리고 저의 옆에서 항상 도와주시고 격려해주신 해양공학실험실 선배들 혁준이형과 정록이형, 그리고 헤빈이에게 감사하다는 말을 전하고 싶습니다. 또한 대학원 다니면서 많은 도움을 주신 남권호 박사님, 태훈이형, 재일이형, 주호형, 성협이형, 창수, 기철에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다. 학부 때부터 만나 모자란 저를 학교 안밖으로 아껴주고 많은 추억을 공유한 한수형, 인환이형, 대호형, 대희형, 종헌이형, 병진이형, 운용이형 모두 감사합니다. 그리고 종화, 수홍, 수경, 은선, 기배와 여러 후배님 모두에게 감사의 말씀을 전합니다. 끝으로 승철, 영민, 주형, 성호, rex, biet 등 대학친구들과 박윤경 선생님과 운영, 승환, 승건, 성호, 남휘, 순철, 윤범 일고동창모임 및 지민, 우석, 원보, 명현, 영제, 희진, 상우, 용호, 유진 등 표선중 동창들 모두 고맙고 마지막으로 가마리에 잘 살고 계시는 사랑하는 우리 아버지, 어머니, 종철이에게 감사하다는 마음을 전합니다. 모두 감사합니다.