

Helmholtz 공명원리를 이용한 해수교환형 방파제의 성능해석

조일형*

1. 서론

본 연구에서는 음향학에서 음파를 제어하는데 주로 이용되는 헬름홀츠 공명장치의 원리를 방파제에 응용하였다. 외해에서 발생한 입사파는 Fig.1에 보여진 입구를 가진 공명 구조물(Resonant Structure)을 만나면 에너지 일부는 입구를 통하여 방사(Radiate)되며 또 일부 에너지는 입구를 통하여 공명 구조물 안으로 방사된다. 공명 구조물 안으로 들어온 파의 주파수와 공명 구조물의 고유 주파수(Natural Frequency)들 중 첫 번째 공진 모드(Resonance Mode)의 주파수가 일치되면 구조물 내부에서의 파는 크게 증폭된다. 특히 첫 번째 공진 모드에서의 파도응답(Wave Response)은 다른 공진 모드에서의 응답보다 월등히 크며 공명 구조물 내부에서의 수면은 일정하게 올라가거나 내려간다. 항내·외의 해수교환을 위하여 공명 구조물 내부(수면 부근) 적당한 위치에 수로를 만든다. 수로는 구조물 후면에 위치한 항내에 연결된다. 공진 현상에 의해 크게 증폭된 파의 위치에너지는 공명 구조물 내부의 해수를 수로를 통하여 항만쪽으로 이동시킨다. 이와 같이 항만으로 유입된 유량은 항만내 해수의 순환을 촉진시켜 항만내 수질개선에 큰 효과를 준다.

공명구조물 내의 파도응답에 대한 해석은 기본적으로 Monkewitz와 Nguyen-Vo(1985)가 사용한 정합점근전개법(Matched Asymptotic Expansion Method)을 이용하였다. 이 방법에서는 유체영역을 해양과 공명구조물 내부 그리고 공명구조물 입구영역등 3가지 영역으로 나누어, 각 영역에서 경계치 문제를 독립적으로 풀고 부족한 경계조건으로부터 생기는 미지수를 인접한 영역의 해와 정합시켜 구한다. 대상 모형으로는 수학적으로 표현이 가능한 반원형 공명구조물을 채택하였고, 한 개의 공명구조물이 놓여진 경우와 여러개 배열된 경우를 함께 취급하였다. 해석해의 타당성을 검증하기 위하여 경계요소법(Boundary Element Method)을 이용한 수치계산결과와 검증하였다. 또한 KRISO의 2차원수조에서 모형실험을 수행하였다. 모형실험은 원형 수로를 열었을 때와 닫혔을 때 2가지 경우에 대하여 공명구조물내의 증폭비(Amplification Factor)를 측정하였고 열었을 때 수로를 통과하는 흐름속도를 측정하였다.

2. 해석이론

정합점근전개법을 사용하여 공명구조물내의 파도응답에 대한 근사해를 얻기 위하여 몇가지 가정들이 필요하다.

- 1) 선형포텐셜이론을 가정한다.
- 2) 수심은 일정하다.
- 3) 공명구조물 입구의 폭과 길이는 입사파의 파장에 비해 아주 작다.
- 4) 입사파의 진행방향은 공명구조물에 수직이며, 수심에 따라 일정한 수직벽에서 전반사가 일어난다고 가정한다.
- 5) 마찰과 박리(Separation)에 따른 에너지 손실은 무시한다.

이러한 가정 하에서 속도포텐셜을 도입하고, 유동은 시간에 따라 조화운동을 한다고 가정한다. 속도

* 한국기계연구원 선박해양공학연구센터 해양기술연구부

포텐셜과 자유표면식은 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$\phi(x, y, z, t) = \text{Re}\{\phi(x, y) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-i\omega t}\} \quad (1)$$

$$\zeta(x, y, t) = \text{Re}\{\eta(x, y) e^{-i\omega t}\} \quad (2)$$

$$\eta(x, y) = \frac{i\omega}{g} \phi(x, y) \quad (3)$$

여기서 (x, y) 는 정수면을 뜻하며 g 는 중력 가속도이다. 주파수 ω 는 아래와 같은 선형 분산식 (Dispersion Relation)을 만족한다.

$$\omega^2 = g k \tanh kh \quad (4)$$

식(1)을 3차원 Laplace 방정식에 대입하여 정리하면 속도포텐셜 ϕ 와 자유표면식 η 는 잘 알려진 Helmholtz 방정식을 만족한다.

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0, \\ \nabla^2 \eta + k^2 \eta = 0 \end{cases} \quad (5)$$

본 논문에서는 공명구조물 입구가 파장에 비해 작다는 가정 하에 음향학에서 헤름홀츠 공명장치 문제를 다룰 때 이용되는 정합점근전개법(Monkewitz and Nguyen-Vo, 1985)을 사용하여 공명구조물 내의 파도응답을 다루고 이에 대한 물리적 현상을 규명하고자 한다. 대상 모델은 반원형 공명구조물이며 자세한 기하학적 형상은 Fig.1과 같다.

3. 경계요소법

앞장에서 사용한 정합점근전개법은 공명구조물 형상이 수학적으로 표현될 때 가능한 해석해이므로 임의의 형상의 갖는 공명구조물에 대하여는 수치해법을 이용하여야 하며, 선형 포텐셜이론에 적합한 유한요소법(FEM), 경계요소법(BEM)등 많은 수치해법들이 개발되었다. 유한요소법은 자유표면을 갖는 형상이 복잡한 문제를 푸는 도구로 이용되어 왔다. 그러나 이 방법은 형상이 복잡한 문제에 적용할 때, 유체영역을 분할하는데 상당한 어려움이 뒤 따른다. 이에 반하여 경계요소법(BEM)은 유체 영역이 아닌 경계면을 분할하여 경계면에서의 값을 구하기 때문에 요소분할이 상대적으로 간단하다. 또한 유체영역이 무한 또는 반무한인 문제나 정확도를 요구하는 문제에 있어서 유한요소법에 비하여 우위에 있다. 본 연구에서는 수심이 일정하다는 가정하에서 경계요소법을 사용하여 공명구조물내의 파도응답을 살펴보고 정합점근전개법을 사용한 해석해의 결과와 비교하였다.

4. 모형실험

해석해와 수치해의 타당성을 검증하고 실제로 공명구조물과 항만내를 수로로 연결하였을 때 해수 교환 정도를 조사하기 위하여 길이 20m 깊이 1m 폭 0.6m인 2차원 수조에서 모형실험을 수행하였다. 수조 전면에 설치된 조파기는 피스톤(Piston) 타입이다. 해수교환형 방파제의 모형은 아크릴로 제작되었다. 공명구조물의 형상은 입구를 가진 지름 37.5cm인 반원형이며, 항만내와 지름 5.4cm인 원형

파이프로 연결되었다. 원형 파이프의 위치는 수면에서 10cm 잠겨있다. 수심은 0.6m로 고정시켰다. 공명구조물의 입구 폭($2a$)과 길이($2b$) 변화에 따른 공명구조물 내의 증폭비($\frac{17\eta}{A}$) 변화를 살펴보기 위하여 입구 폭(6,8,10cm)과 입구의 길이(1,2cm)를 바꿔가면서 총 6가지 경우에 대하여 수행되었다. 먼저 공명구조물을 2차원 수조에서 제거한 후 주어진 조파기의 주파수와 왕복 변위에 대하여 입사파의 파고를 미리 예측하였다. 모형실험은 0.4 Hz에서 1.4 Hz 사이에 모두 13개의 진동수에 대하여 수행되었다. 다음에 공명구조물을 삽입한 후 공명구조물내의 3지점에서 파고를 예측하였다. 이때 원형 파이프는 닫혀진 상태로 실험을 수행하였다. 첫번째와 두번째 실험으로부터 공명구조물 안에 정해진 위치에서 증폭비를 구했고, 이 결과를 2장의 해석해와 3장의 수치해와 비교하였다. 실험에서 수행한 모델은 Fig.2와 같은 여러개의 공명구조물을 배열한 형태와 같다. 해석해와 수치해는 공명구조물 입구에서의 박리에 의한 에너지 손실을 고려하지 않았지만 실험에서는 공명구조물 입구에서 박리가 발생하여 이에 따른 에너지 손실이 생겼다. 이러한 박리현상은 공진점에서의 증폭비를 크게 감소시키고 공진점을 저주파수 영역으로 이동시키는 특징을 가지고 있다. 공명구조물이 해수교환능력이 있는지 또한 해수교환량은 얼마인지는 살펴보기 위하여 원형 파이프를 연 상태로 두번째와 유사한 실험을 수행하였다. 이때 해수교환량을 측정하기 위하여 원형 파이프 적당한 위치에 구멍을 뚫고 유속계를 설치하였다. 유속계는 전자식 유속계로 2방향의 유속을 한꺼번에 재는 계측장비로 본 실험에서는 x 방향의 유속만을 측정하였다. 세번째 실험에서도 두번째 실험과 마찬가지로 공명구조물내 3지점에서의 파고를 측정하였다. 원형 파이프 개폐 유무에 따른 공명구조물내의 증폭비를 서로 비교하였다.

5. 참고문헌

- [1] Monkewitz, P.A. & Nguyen-Vo, N.-M. (1985), "The response of Helmholtz resonators to external excitation. Part 1. single resonators" J.Fluid of Mechanics, Vol.151. pp.477-497
- [2] Monkewitz, P.A.(1985), "The response of Helmholtz resonators to external excitation. Part 2. arrays of slit resonators" J.Fluid of Mechanics, Vol.156. pp.151-166
- [3] 趙一衡, 1991. 港灣內 波濤應答과 繫留船舶의 運動解析, 서울大學校 博士 學位論文

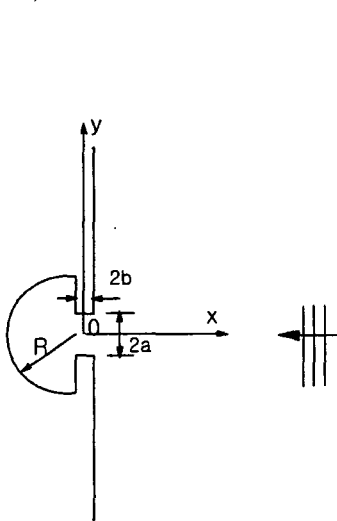


Fig.1 Definition Sketch of Helmholtz Resonant Structure

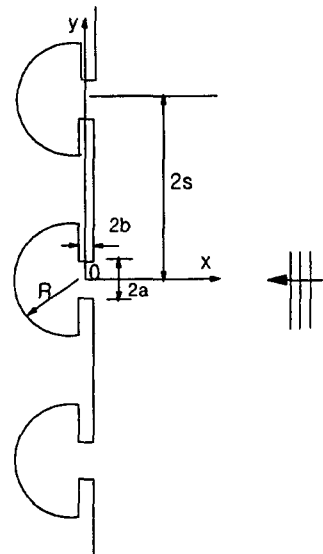


Fig.2 Definition Sketch of Arrays of Helmholtz Resonant Structures

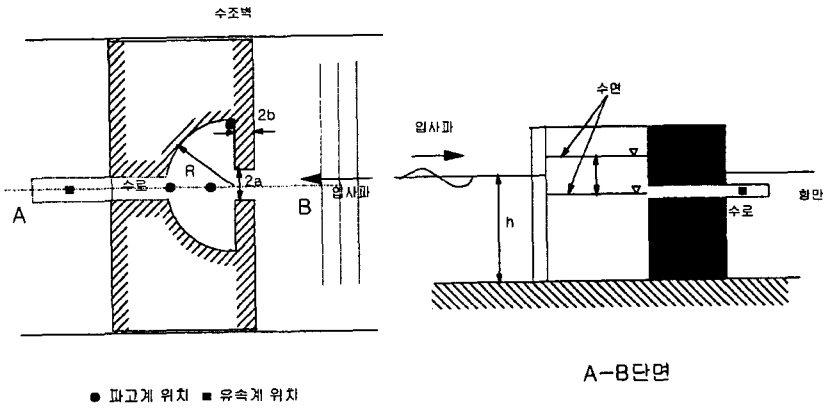
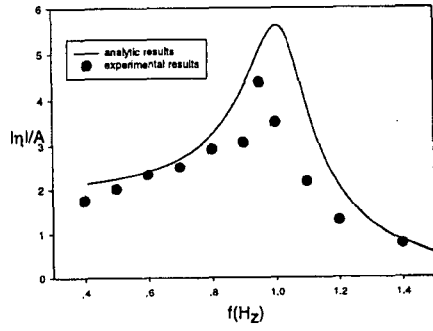
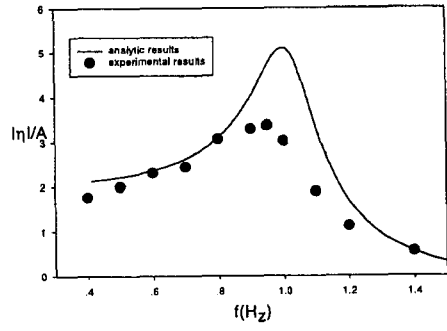


Fig.3 Set-up of Model Test



(a) wave probe1



(b) wave probe2

Fig.4 Comparison of Analytic and Experimental Results ($|\eta_H|/A$) in a Semi-circle for Arrays of Helmholtz Resonator ($b/a=0.1, a/R=0.267, s/R=1.6$)