

# 직립 타공판 배열을 이용한 흡음장치 설계

이종무\* · 조일형\*\* · 임용곤\*

\*한국해양연구소 선박해양공학분소

\*\*제주대학교 해양산업공학부

## Design of Sound Absorbing System Using the Array of Upright Punching Plates

Chong-moo Lee\* · Yong-kon Lim\* · Il-hyung Cho\*

\*Korea Ocean Research and Development Institute

\*\*Cheju University

E-mail : jmlee@kriso.re.kr

### 요 약

타공 구조물은 음파의 에너지를 감소시키는 특성을 가지고 있어 무향실의 벽에 많이 이용되고 있다. 음원에서 발생한 음파가 타공판을 통과할 때 타공판의 작은 구멍을 통해 강한 제트가 형성되어 점성에 의한 박리가 일어나 음파 에너지의 일부분이 열에너지로 소멸된다. 타공판의 작은 구멍을 통과하면서 발생하는 물리적 현상은 음향학 분야에서 많은 연구가 이뤄졌다. 타공판의 앞뒤의 음압(Acoustic Pressure)의 차이를 속도에 제곱에 비례하는 항력항(Drag Term)과 가속도에 비례하는 관성항(Inertia Term)의 합으로 표현하였고, 각 항에 포함된 계수들을 실험이나 간단한 계산을 통하여 구하는 방법을 제시하였다.

### ABSTRACT

Due to its characteristics of acoustic wave energy absorption, punched structures are generally applied on the wall of anechoic room. When the acoustic wave propagates through the punched plates, its energy dissipates into thermal energy by flow separation induced from the viscosity of acoustic media. The acoustic pressure difference between the for-side and the aft-side of punched plate can be represented by the sum of drag term proportional to square of velocity and inertia term proportional to acceleration. The way to get the coefficients of the terms by an experiment or relatively simple calculation is introduced.

### 1. 서 론

타공판에 의한 중력파(Gravity Waves)의 반사율(Reflection Coefficient)과 투과율(Transmission Coefficient)은 Chwang(1984)에 의하여 계산되었다. 그는 한 끝에 벽이 있는 2차원 반 무한(Semi-Infinity) 수조내에 타공판이 설치되어 있을 때 타공판에 의한 반사율을 계산하였다. 그들의 계산결과에 의하면 입사파의 파장( $\lambda$ )과 타공판과 벽면사이의 거리( $L$ )사이의 관계가  $\lambda = \frac{4L}{1+2m}$  ( $m=0, 1, 2, 3, \dots$ )일 때 타공판

에 의한 반사율이 최소가 됨을 밝혔다. Madsen(1983)는 직립 타공판을 해양수조에 설치될 소파기(Wave Absorber)에 적용한 문제를 다뤘는데, 공극율이 다른 여러개의 타공판을 설치했을 때 반사율의 차이를 실험을 통하여 구하였다. 그들은 공극율이 다른 타공판들을 효과적으로 배치하면 전체 시스템의 반사율을 5%이내로 유지할 수 있음을 밝혔다. 실제로 직립 타공판을 이용한 소파장치는 캐나다 NRC와 미국의 OTRC의 해양공학수조에서 현재 운용중에 있다. 여러개의 타공판 배열에 의한 반사율 계산은 Twu, Lin(1990)에 의하여 선형포텐셜 이론을 가정하여 수행되었다. 이때 점성에 의한 항력계수는 간단한 실험을 통

하여 얻었으며, 타공판에 의한 관성항은 무시되었다. 간단한 실험으로부터 얻어진 항력계수들을 이용하여 공극율이 서로 다른 타공판 배치에 따른 반사율을 계산하였다. 그들의 결론에 의하면 파를 처음으로 만나는 타공판은 공극율이 상대적으로 큰 것을 사용하며 그 후의 타공판은 점차적으로 공극율이 작은 타공판을 설치해야 반사파의 에너지를 최소화할 수 있다는 사실을 2차원 계산을 통하여 밝혔다.

본 연구에서는 KRISO에서 현재 건설중에 있는 무향수조에 설치될 흡음재를 여러개의 직립 타공판을 이용한 시스템으로 구성할 때 공극율이 서로 다른 타공판에 의한 반사율과 타공판 배치에 따른 반사율을 수치계산을 통하여 살펴보았다. 이러한 계산결과를 이용하여 2차원 수조에서 기초적인 실험을 수행할 것이며 이를 토대로 해양수조에 설치될 무향수조를 설계·제작할 예정이다.

## II. 문제의 정식화

Fig.1과 같이 무향수조내에 직립 타공판이 음파의 진행방향과 수직으로 놓여 있다고 생각하자. 음파는 규칙파로 가정하고 주파수  $\omega$ 를 갖고 타공판에 수직으로 들어온다. 음파의 파장에 비하여 타공판의 두께는 아주 작고, 타공판은 음파에 의하여 변형되지 않는다고 가정하자.

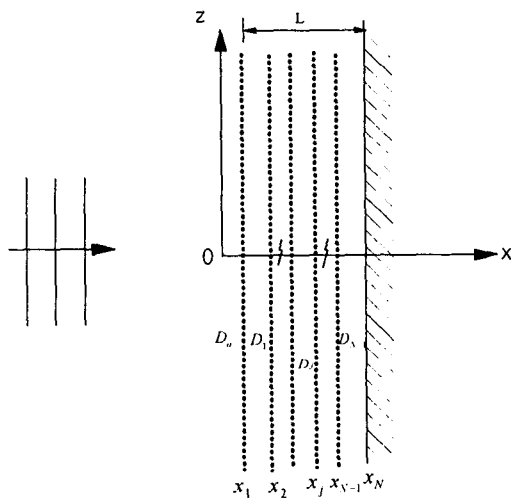


Fig.1 Definition sketch of noise barrier using the array of upright punching plates

타공판 내부에서의 유동을 풀기 위하여 유동은 아래와 같은 연속방정식과 Euler 방정식을 만족하여야 한다.

$$\begin{cases} \nabla \cdot U = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\nabla P}{\rho} - f\omega U - C_m \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \frac{\partial U}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $U$ 는 타공판 내부에서의 침투속도 (Seepage Velocity)를,  $P$ 는 변동압력 (Dynamic Pressure)을 나타낸다. 계수  $\epsilon, f, C_m$ 은 각각 공극율(Porosity), 박리에 의한 항력계수(Drag Coefficient), 부가질량계수(Added Mass Coefficient)를 뜻한다.  $f, C_m$ 은 실험을 통하여 얻어지며, 유체의 점성, 타공판의 국부형상(Local Shape), 거칠기 정도(Roughness), 공극율에 따라 변한다.

침투 속도와 압력이 주파수  $\omega$ 를 갖고 조화운동을 한다고 가정하면  $U, P$ 는 다음과 같이 시간과 공간함수로 분리할 수 있다.

$$U = Re\{ue^{-i\omega t}\} \quad (2)$$

$$P = Re\{pe^{-i\omega t}\}$$

식(2)을 식(1)에 대입하여 정리하면

$$\begin{cases} \nabla \cdot u = 0 \\ \nabla p + \rho\omega Ru = 0 \\ R = f - i[1 + C_m(1-\epsilon)/\epsilon] \end{cases} \quad (3)$$

이다. 여기서  $\rho$ 는 물의 밀도이다. 타공판의 특성을 나타내는  $R$ 의 실수부와 허수부는 각각 속도에 비례하는 항력항과 가속도에 비례하는 관성항을 나타낸다.

속도와 압력의 수평방향 변화율이 수직방향 변화율에 비하여 크므로 윗식은 다음과 같이 1차원 문제로 바뀐다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x} + \rho\omega Ru = 0 \quad (4.5)$$

식(4)로부터 침투속도  $u$ 는  $x$  방향에 따라 변하지 않는다는 사실을 알 수 있다. 이를 이용하여 식(5)를  $x$ 에 따라 적분하면

$$u = -(p_{\delta-} - p_{o+}) / (\rho\omega\delta R) \quad (6)$$

이다. 여기서  $p_{o+}, p_{\delta-}$ 는  $x=0, \delta$ 에서 타공판 내부 압력을 나타낸다. 식(6)으로부터 타공판 내부의 침투속도는 압력차에 비례한다는 사실을 알 수 있다. 이때 침투속도는 압력과 위상차를 가지며 그 위상차는 항력항과 관성항의 크기에 따라 정해진다. 항력항이 관성항에 비하여 아주 크다면 위상차는 0도이며 이를 Darcy법칙이라 부른다.

타공판 안과 밖에서의 속도와 압력의 관계식

을 유도하기 위하여  $x=0$ 과  $x=b$ 에서 정합조건들을 적용하자.

$$u_{0-} = u_{\delta+} = \epsilon u \quad (7)$$

$$p_{0-} = p_{0+} \quad p_{\delta+} = p_{\delta-}$$

여기서 +, -는 타공판의 안과 밖의 위치를 나타낸다. 윗식을 식(6)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$u_{0-} = -\frac{\epsilon}{\rho\omega\delta R}(p_{\delta+} - p_{0-}) \quad \text{at } x=0- \quad (8)$$

$$u_{\delta+} = -\frac{\epsilon}{\rho\omega\delta R}(p_{\delta+} - p_{0-}) \quad \text{at } x=\delta+$$

타공판의 두께( $=\delta$ )가 작다고 가정하여 타공판이  $x=0$ 에 놓여 있다고 하면 식(8)로부터 타공판에서의 아래와 같은 경계조건식을 얻을 수 있다.

$$u_{0+} = u_{0-} = -\frac{kG}{\rho\omega}(p_{0+} - p_{0-}) \quad \text{at } x=0^{\pm} \quad (9)$$

여기서  $G$ 는  $R$ 과 마찬가지로 타공판의 종류(형상, 공극율, 항력)와 주파수에 따라 달라지는 특성변수로 아래와 같이 정의된다.

$$G = \epsilon/Rk\delta = G_R + iG_I \quad (10)$$

$\epsilon=0$   $R \rightarrow \infty$ 일 때  $G=0$ 이며, 이때 타공판은 직립벽이 되며,  $G \rightarrow \infty$ 는 투명한 판을 뜻한다. 본 연구에서는 Darcy법칙을 따랐다. 따라서  $G$ 은 실수이며 타공판에 작용하는 항력과 밀접한 관계가 있다.

### III. 타공판 배열에 따른 소파성능 해석

타공판의 소파성능은 타공판의 종류( $G$ 의 값)와 배열에 따른  $G$ 의 분포에 따라 달라진다. 대체적으로 첫 번째 타공판은 공극율이 큰 것을 사용하고 끝으로 갈수록 공극율이 작은 타공판을 사용한다. 따라서  $G$ 는 끝으로 갈수록 작은 값을 갖는다. 여기서는 타공판을  $N$ 개 설치하였을 때 여러 가지  $G$ 분포 함수에 대한 반사파의 특성을 살펴보았다.

Fig.2와 같이  $N$ 개의 타공판들에 의하여 나뉜 유체영역을  $D_0, D_1, \dots, D_{N-1}, D_N$ 으로 하자. 음파의 진행방향은  $x$ 축의 양의 방향이다. 각 영역에서 음압은 아래와 같이 1차원 Helmholtz 방정식과 벽면경계조건을 공통으로 만족한다.

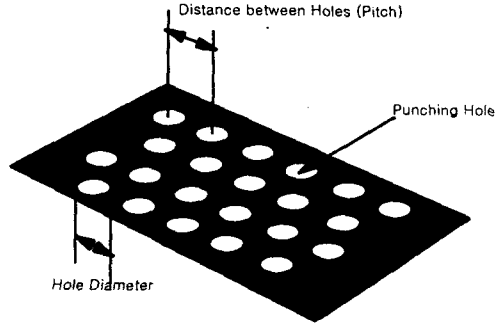


Fig.2 Detailed view of punching plates

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 P_j}{\partial x^2} + k^2 P_j = 0 & \text{in fluid domain} \\ \frac{\partial P_{N-1}}{\partial x} = 0 & \text{at } x = x_N \end{cases} \quad (11)$$

또한  $x \rightarrow -\infty$ 에서 아래와 같이 방사조건(Radiation Condition)을 만족한다.

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \left( \frac{\partial}{\partial x} + ik \right) (P_0 - P_j) = 0 \quad (12)$$

단위진폭을 갖고  $x$ 축의 양의 방향으로 들어오는 음압은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_j = e^{ikx} \quad (13)$$

위에 주어진 지배방정식과 경계조건들을 만족하는 각 영역에서의 음압을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} P_0 = (e^{ikx} + R_0 e^{-ikx}) & \text{at } x < x_1 \\ P_1 = (T_1 e^{ikx} + R_1 e^{-ikx}) & \text{at } x_1 < x < x_2 \\ \vdots \\ P_j = (T_j e^{ikx} + R_j e^{-ikx}) & \text{at } x_j < x < x_{j+1} \\ \vdots \\ P_{N-1} = T_{N-1} (e^{ikx} + e^{2ikx_j} e^{-ikx}) & \text{at } x_{N-1} < x < x_N \end{cases} \quad (14)$$

여기서 파수(Wave number)  $k$ 는  $k = \omega/C$ 을 만족한다.  $C$ 는 음속으로  $1,500m/sec$ 이다. 부족한 경계조건들로부터 생기는 미지수는 타공판이 놓여진 위치에서 앞에서 유도한 물체경계조건들을 적용하여 구해진다.

$$\frac{\partial P_{j-1}}{\partial x} = \frac{\partial P_j}{\partial x} = ikG_j (P_{j-1} - P_j) \quad \text{at } x = x_j \quad j = 1, 2, \dots, N-1 \quad (15)$$

타공판의 특성을 나타내는 변수인  $G$ 는

$$\text{Huang \& Chwang(1990)에 의하면 } G = \frac{\rho b_o \omega}{\mu k}$$

로 다르게 정의될 수 있으며, 타공판의 공극율과 국부형상(Local Shape)에 밀접한 관련이 있다. 주어진 식에서  $G$ 와 선형적으로 비례하는  $b_o$ 는 공극율 계수(Porosity Coefficient)로 길이 차원을 갖는다.  $b_o \rightarrow 0$ 는 불투과성 판을 의미하며,  $b_o \rightarrow \infty$ 는 입사파에 전혀 영향을 주지 않는 가상의 판이 놓여 있는 경우이다. 계산에는 새로운 무차원 공극율 계수  $b$ 을 도입하였다.  $b$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$b = 2\pi G = \frac{2\pi\rho\omega b_o}{\mu k} \quad (16)$$

타공판의 공극율 ( $= \epsilon$ ) 과 공극율 계수 ( $= b$ ) 는 관계식은

$$b = 57.63\epsilon - 0.9717 \quad (17)$$

이다. 이 방정식은 2차원 조파수조에서 일련의 실험을 거쳐서 얻은 식이며, 이 방정식을 사용하면 실험에서 사용하지 않은 다른 타공판에 해당되는 공극율 계수  $b$ 을 구할 수 있기 때문에 어떤 종류의 타공판에 대하여 수치계산이 가능하다.

식(14)를 식(15)에 대입하여 정리하면  $2N \times 2N$  대수방정식을 유도할 수 있다.

$$(1 + G_1)e^{-ikx_1}R_o - G_1e^{-ikx_1}R_1 - G_1e^{ikx_1}T_1 = (1 - G_1)e^{ikx_1}$$

$$G_1e^{-ikx_1}R_o + (1 - G_1)e^{-ikx_1}R_1 - (1 + G_1)e^{ikx_1}T_1 = -G_1e^{ikx_1}$$

$$(1 + G_j)e^{-ikx_j}R_{j-1} - G_je^{-ikx_j}R_j + (G_j - 1)e^{ikx_j}T_{j-1} - G_je^{ikx_j}T_j = 0$$

$$G_je^{-ikx_j}R_{j-1} + (1 - G_j)e^{-ikx_j}R_j + G_je^{ikx_j}T_{j-1} - (1 + G_j)e^{ikx_j}T_j = 0$$

$$(1 + G_{N-1})e^{-ikx_{N-1}}R_{N-2V}$$

$$+ (G_{N-1} - 1)e^{ikx_{N-1}}T_{N-2}$$

$$- G_{N-1}(e^{ikx_{N-1}} + e^{2ikx_N}e^{-ikx_{N-1}})T_{N-1} = 0$$

$$G_{N-1}e^{-ikx_{N-1}}R_{N-2} + G_{N-1}e^{ikx_{N-1}}T_{N-2}$$

$$+ [-(1 + G_{N-1})e^{ikx_{N-1}}$$

$$+ (1 - G_{N-1})e^{2ikx_N}e^{-ikx_{N-1}}]T_{N-1} = 0 \quad (18)$$

이 방정식을 풀어 각 영역에서의 미지수들을 구한다. 전체 시스템의 반사율은  $R_f = |R_o|$  이다.

#### IV. 계산결과 및 고찰

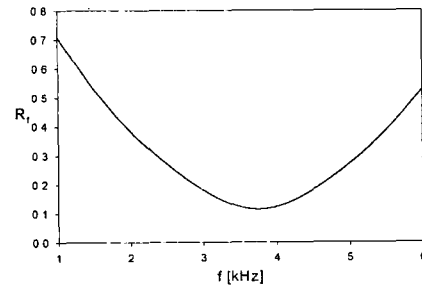


Fig.3 Reflection coefficient of plane acoustic waves due to single upright punching plate

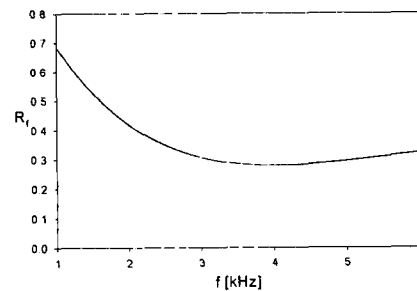


Fig.4 Reflection coefficient of plane acoustic waves due to double upright punching plates(1 kind)

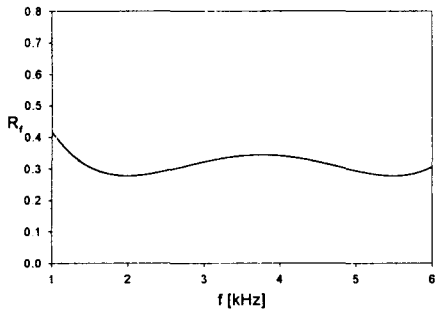


Fig.5 Reflection coefficient of plane acoustic waves due to double upright punching plates(2 kinds)

Fig.3은 타공판 1장이 설치되었을 때의 계산결과이다. 이때 타공판의 공극율 계수  $b$ 는 5.0이다. 타공판과 벽면사이의 거리는 10cm이다.  $x$ 축은 음파의 주파수  $f$ (kHz)이며,  $y$ 축은 반사율을 나타낸다.  $f=3.7$ kHz까지는 주파수가 증가함에 따라 반사율이 감소하다가 그 이후부터는 반사율이 점차 증가하는 것을 보여주고 있다. Fig.4는 공극율이 같은 타공판을 2장 설치하였을 때 계산 결과를 보여주고 있다. 타공판의 간격은 5cm이며, 설치거리는 10cm이다. 타공판을 2장 설치했음에도 불구하고 반사율이 오히려 커짐을 볼 수 있다. Fig.5는 타공판의 간격을 Fig.3과 같이 10cm로 하여 2장을 설치한 경우이다. 전체 설치길이가 20cm일 때 반사율을 보여주고 있다. Fig.4에 비하여 반사율이 줄어든 것을 알 수 있다. 또한 계산 주파수 범위내에서는 대체로 일정한 반사율을 보여주고 있다.

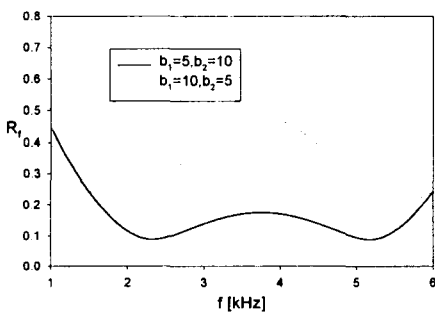


Fig.6 Reflection coefficient of plane acoustic waves due to double upright punching plates(2 kind)

Fig.6은 공극율이 서로 다른 타공판

( $b=5, 10$ ) 2장을 설치하였을 때의 계산결과이다. 타공판의 간격은 10cm이며, 전체 설치길이는 20cm이다. 실선은 파의 진행방향에 따라 공극율 계수가 감소하도록 타공판을 설치한 경우이며 점선은 그 반대의 경우이다. 음파의 진행방향에 따라 공극율 계수가 감소하도록 타공판을 배치한 경우가 반사율이 훨씬 줄어드는 것을 볼 수 있다. Fig.7은 서로 다른 3장의 타공판 ( $b=20, 10, 5$ )을 설치하였을 때의 결과들이다. 타공판의 간격은 10cm이며, 설치길이는 30cm이다. 실선은 공극율 계수가 감소하도록 타공판을 배치한 반사율의 결과이며 점선은 공극율 계수가 증가하도록 타공판을 배치하였을 때의 계산결과이다. Fig.6과 마찬가지로 파의 진행방향으로 공극율이 작은 타공판을 설치하는 것이 반사율을 감소시키는데 효과적이다.

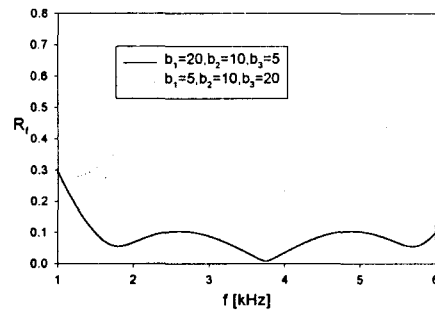


Fig.7 Reflection coefficient of plane acoustic waves due to triple upright punching plates(3 kinds)

Fig.7은 타공판의 숫자가 증가하면 그에 비례하여 반사율을 감소되는 가를 보여주는 그림이다. 실선은 Fig.6에서 살펴본 서로 다른 타공판을 공극율 계수가 감소하도록 설치한 경우이다. 점선은 3장의 타공판 사이사이에 앞 타공판과 같은 타공판을 추가로 설치한 경우이다. 따라서 타공판의 간격은 5cm이며, 3종류 타공판을 6장을 설치한 경우이다. 타공판의 숫자가 2배로 늘었지만 반사율은 오히려 나빠지는 것을 볼 수 있다.

## V. 결론

이상의 계산결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 간단한 수학적 모델에 대하여 직립형 타공판에 의한 반사율을 계산하는 프로그램을 개발하였다. 계산 프로그램은 임의의 개수의 타공판을 배열하였을 때 반사율을 계산할 수 있다.

2) 타공판의 간격을 일정하게 유지하면서 타공판의 숫자가 증가시키면 반사율은 줄어든다. 그러나 주어진 설치거리 안에 타공판을 증가시키면 반사율은 오히려 떨어진다.

3) 파의 진행방향으로 공극을 계수가 점차 감소하도록 판들을 설치했을 때가 공극을 계수가 증가하도록 판들을 설치했을 때 보다 우수한 소파성능을 보여주고 있다.

### 후 기

본 연구는 한국해양연구소에서 수행한 기관고유사업인 '음향파 거동해석기법을 이용한 수중초음파 시스템 시험기법 개발'의 결과 중 일부임을 밝히는 바이다.

### 참고문헌

- [1] Chwang, A.T. & Dong, Z. N. (1984) 'wave trapping due to a porous plate' Proc. 15th ONR Symp. Naval Hydro-dynamics, Washington DC, 409-417
- [2] Huang, L.H. & Chwang, A.T. (1990) 'trapping and absorption of sound waves. I. A screened sphere' Wave motion, 12, 1-3
- [3] Madsen, P.A. (1983) 'wave reflection from a vertical permeable wave absorber' Coastal Engineering, Vol. 7, 381-396
- [4] Mei, C. C., Liu, Philip L-F., Ippen, A.T. (1974) 'quadratic loss and scattering of long waves' J. of the Waterways Harbors and Coastal Engineering Vol. 100, 217-239
- [5] Mei, C. C. (1985) 'THE APPLIED DYNAMICS OF SURFACE WAVES' JOHN WILEY & SONS
- [6] Newman, J. N. (1965) 'propagation of water waves past long two dimensional obstacles' J. Fluid Mech. , Vol. 23, 23-29
- [7] Twu, S. W. & Lin, D.T. (1990) ' wave reflection by a number of thin porous plates fixed in a semi-infinity long flume' Proc. 22nd Coastal Engineering, 15 Elsevier, 389-405