

원형파일군에 의한 파랑제어 특성

이성대* · 김성득**

*한라대학교 토목공학과

**울산대학교 건설환경공학부

Effects of Wave Dissipation with Circular Cylinders

SEONG-DAE LEE* AND SEONG-DEUK KIM**

*Dept. of Civil Engineering, Halla Univ., Gangwon-do, Korea

**Dept. of Civil and Environmental Eng., University of Ulsan, Ulsan, Korea

KEY WORDS: Vertical cylinders 원형파일군 Wave dissipation 파랑감쇠 Unsteady mild slope equation 비정상완경사방정식 Opening Ratio 개구율, Numerical model 수치모형, Hydraulic experiment 수리실험

ABSTRACT: One of the central problems in a study of the coastal surface wave environment is predicting the transformation of waves as they propagate toward the shore. The transformation is mainly due to the existence of obstacles, such as breakwaters and vertical cylinders. In general, the types of wave transformation can be classified as follows: wave diffraction, reflection, transmission, scattering, radiation, et al. This research dealt with wave transmission and dissipation problems for two dimensional irregular waves and vertical circular cylinders. Using the unsteady mild slope equation, a numerical model was developed to calculate the reflection and transmission of regular waves from a multiple-row circular breakwater and vertical cylinders. In addition, hydraulic model experiments were conducted with different values for the properties between the piles and the opening ratio (distances) between the rows of the breakwater. It was found that the transmission coefficients decreased with a decrease in the opening ratio and an increase in the rows of vertical cylinders. A comparison between the results of hydraulic and numerical experiments showed reasonable agreement.

1. 서 론

최근 국내외 해상물동량의 증가에 따라 지속적인 신항만 건설 및 기존 항만시설의 확충과 정비 방안이 요구되고 있으며 이에 따라 항만이나 어항의 개발사업이 계획되고 있거나 건설 중에 있다. 항만건설을 위해서 무엇보다도 중요한 것은 항내 하역작업의 효율적 수행을 위해 외해로부터 전파되는 내습파랑을 효과적으로 차단·감쇄하여 박지에서의 정온수역을 확보하는 것이다. 정온수역의 확보를 위해서는 항만의 기본시설인 외곽시설의 적절한 배치가 필수적이다. 외곽시설은 기능면에서는 단순히 외해로부터 밀어 닳치는 파랑을 차단하는 역할을 수행하며 구조적으로는 대부분 착저식으로 자체 중량에 의해 지지되는 형식을 갖고 있다. 우리나라의 외곽시설은 중력식인 사석경사제나 케이슨식 혼성방파제가 대표적인 형태이다. 하지만 사석경사제는 수심이 깊어지는 경우 많은 공사물량이 소요되고 이를 위한 대규모의 사석이 요구되며, 혼성방파제는 기본적으로 불투과성이므로 항내·외의 흐름정체를 일으키며 이에 의한 항내의 수질악화를 야기시키는 등의 문제점이 있어왔다.

최근에는 방파제를 단순히 방파나 소파의 성능만으로 평가하는 단계를 넘어서 경제적인 측면과 함께 친환경·친수기능

의 측면을 고려하여 계획되어지고 있는 실정이다. 특히 항내정온도 향상을 위해 외곽시설을 연장하는 경우 항내 해수교환율의 저하가 심각한 문제가 되고 있으며 이에 따른 항내 수질악화가 여러 가지 사회문제로 대두되고 있는 실정이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 기존 방파제의 일부구간에 외해에서의 입사파를 항내로 유입시키는 형식의 해수교환형 월류시설을 축조하는 계획이 이루어지고 있으며(Akeda et al., 1998), 이에 대한 다양한 수리학적 연구 검토를 통해 해수교환형 방파제의 항내유입유량과 항내순환특성에 관한 연구가 행해지고 있다(정신택 등, 2004).

이와 함께 항내수질의 개선과 항내정온도의 향상을 위한 투과성 방파제가 제안되고 있으며 이론적 및 실험적 연구를 통한 다양한 해석이 이루어지고 있다. Suh et al.(2006), 서경덕과 지창환(2007)은 상부는 커트월형식을 그리고 하부는 파일방파제로 구성된 투과성 방파제를 제안하여 이를 고유함수전개법(Eigenfunction expansion method)으로 해석하여 반사율과 투과율을 구하였으며, 조일형과 고혁준(2007)은 단일 파일형식의 투과성방파제에 대한 소파특성을 고유함수전개법을 이용하여 해석하고 FLUENT 상용코드의 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 그리고 이상화 등(2007)은 다원주 파일군 방파제의 파랑제어특성을 파악하기 위하여 3차원 수치모형실험을 통해 항내정온효과를 검토하였다. 이같은 원주파일군에 의한 투과성방파제에 대해서는 해수유통을 원활히하여 항내외의 해

교신저자 이성대: 강원도 원주시 흥업면 한라대1길 32

033-760-1264 sdlee@halla.ac.kr

수순환을 향상할 뿐만 아니라 파랑제어에도 효율성이 확인되고 있어 외곽시설로서의 가능성이 열려져왔다. 그러나 직립원주군이 존재하는 경우 파랑의 전파과정을 이해하기 위한 이론적 및 실험적 연구는 활발하나 수치모형의 개발은 아직은 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 다열의 연직파일군이 존재하는 투과성방파제의 파랑제어효과를 검토하기 위하여 환경사방정식 수치모형을 통해 그 적용성을 검토하는 것이다. 연직파일군에 의한 파랑전파과정을 파악하기 위해 입사파랑의 조건 뿐만 아니라 파일군에 의한 저항과 저면에서의 마찰특성을 고려하며 특히 파일군의 저항은 파일군의 밀도, 직경 및 배치 등에 따라 변화하므로 이에 관한 정식화(Normalization)를 통해 수치해석을 수행하였다. 그리고 본 수치해석의 타당성을 확인하기 위하여 수리실험을 수행하여 파일군의 배치간격 및 밀도에 따른 파랑의 제어특성을 확인하였다. 수리실험에서는 개구를 50%와 75%에 대해 원형파일의 평면배치를 정3각형 형태의 엇갈림으로 배치하여 실험을 수행하였다. 파랑의 제어특성에 관해서는 연직파일군에 의한 반사 및 투과율의 변화와 구조물에 작용하는 파압의 특성을 검토하여야 하나 방파제의 목적이 기본적으로는 항내 정온수역의 확보에 있으므로 본 연구에서는 투과율의 변화를 중점적으로 비교 검토하였다.

2. 연직파일군의 수치해석

2.1 지배방정식

대상영역은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 일정한 수심 h 의 수역에 파랑이 입사하는 것으로 가정하였으며 수역의 중앙부에 연직파일군의 투과성 방파제가 존재하는 경우를 대상으로 하였다. 연직파일군에 의한 파랑전파 특성을 고려하는 경우에는 입사파의 조건 뿐만 아니라 파일의 크기와 개수, 배치형상 등의 구조물조건에 따라 변화하지만 본 연구에서는 구조물의 조건을 단위면적당 연직파일의 수를 나타내는 파일의 밀도(D)가 대상영역내에서는 일정하게 분포한다고 가정하여 이들을 정식화하였으며, 파랑의 입사방향을 x 축, 측면에서 수역의 횡단방향을 y 축 그리고 정수면상에서 연직상 방향을 z 축으로 좌표계를 설정하였다.

연직파일군을 전파되는 파랑의 거동을 지배하는 기초방정식은 다음과 같은 연속방정식과 운동방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \frac{\partial(nM)}{\partial x} + \frac{1}{n} \frac{\partial(nN)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{du}{dt} = f_v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (3)$$

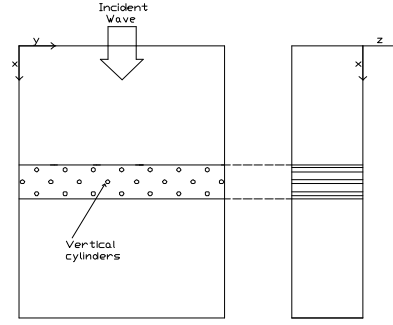


Fig. 1 Definition sketch for model test

여기서 η 는 자유수면변위, M, N 은 각각 x, y 방향의 선유량을 나타내며, $n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right]$, f 는 편향력 계수이다. 또한, x, y, z 는 좌표축으로 x, y 는 평면을, z 는 자유수면상의 연직상방향을 그리고 u, v, w 는 x, y, z 방향의 각 유속성분, p 는 압력, A_h 는 수평방향 확산계수, A_v 는 연직방향 외동점성계수를 나타낸다.

연직방향 외동점성항은 연직파일 영역의 저면전단응력과 파일이 없는 영역의 저면전단응력으로 나누어, 수심방향으로 적분하면 (1)식과 함께 다음과 같은 확장형 비정상완경사 방정식이 된다(이성대, 2006).

$$\frac{\partial M}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{\tau_x}{\rho} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\frac{\tau_y}{\rho} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

여기서 c 는 파속이며, 식 (4), (5)의 우변 제1항의 τ_x, τ_y 는 저면마찰력과 연직파일군에 의한 유체저항항의 합이라고 가정하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_x = \frac{f_o}{2} |QM/h^2 + \frac{f_v}{2} |QM/h^2 \quad (6)$$

$$\tau_y = \frac{f_o}{2} |QN/h^2 + \frac{f_v}{2} |QN/h^2 \quad (7)$$

여기서, $Q = \sqrt{M^2 + N^2}$ 이다. 그리고 연직파일에 의한 항력계수 f_v 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{f_v}{2} u|u| = \frac{C_D}{2} \int_{-h}^0 N d_0 dz u|u| \quad (8)$$

여기서 C_D 는 연직파일의 항력계수, N 은 파일의 갯수(단위면적당 연직파일수), A_v 는 연직파일당 흐름에 대한 투영면적, d_0 는 연직파일의 직경이다.

2.2 수치해석

수치계산은 비정상 환경사방정식으로 나타난 연속방정식, 식 (1)과 운동방정식인 식 (4), (5)를 다음과 같이 유한차분식으로 나타내어 해석하였으며 공간차분에는 수위 η 와 선유량 M, N 을 엇갈림격자로 그리고 시간차분에는 Leap-Frog법을 사용하였다.

연속방정식 식 (1)의 차분식은 다음의 식 (9)와 같이 된다.

$$\eta_{i,j}^{k+1} = \eta_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x}(M_{i+1,j}^{k+1} - M_{i,j}^{k+1}) - \frac{\Delta t}{\Delta y}(N_{i,j+1}^{k+1} - N_{i,j}^{k+1}) \quad (9)$$

그리고 운동방정식 식 (4), (5)의 차분식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M_{i+1,j}^{k+1} = M_{i+1,j}^k - c^2 \frac{\Delta t}{\Delta x}(\eta_{i+1,j}^k - \eta_{i,j}^k) - \Delta t \frac{\tau_x}{\rho} + A_h \left\{ \frac{\Delta t}{\Delta x^2}(M_{i+1,j}^{k+1} - 2M_{i,j}^{k+1} + M_{i-1,j}^{k+1}) + \frac{\Delta t}{\Delta y^2}(M_{i,j+1}^{k+1} - 2M_{i,j}^{k+1} + M_{i,j-1}^{k+1}) \right\} \quad (10)$$

$$N_{i,j+1}^{k+1} = N_{i,j+1}^k - c^2 \frac{\Delta t}{\Delta y}(\eta_{i,j+1}^k - \eta_{i,j}^k) - \Delta t \frac{\tau_y}{\rho} + A_h \left\{ \frac{\Delta t}{\Delta x^2}(N_{i+1,j}^{k+1} - 2N_{i,j}^{k+1} + N_{i-1,j}^{k+1}) + \frac{\Delta t}{\Delta y^2}(N_{i,j+1}^{k+1} - 2N_{i,j}^{k+1} + N_{i,j-1}^{k+1}) \right\} \quad (11)$$

그리고 대상 영역의 상류경계에서는 무반사 경계조건을 사용하였다.

2.3 수치해석 결과

본 수치계산의 타당성을 검토하기 위하여 Fig. 1에 도시한 바와 같이 일정한 수심을 가진 수역에 파랑이 침입하는 것으로 가정하였으며 수역의 중앙부에 일정한 범위의 연직파일군이 존재하는 경우를 대상으로 하였다. 연직파일군과 같은 투과성 구조물에 의한 파랑전파 과정을 해석하는 경우에는 구조물의 조건에 따라 변화하지만 여기서는 파일의 밀도가 대상해역 내에서는 일정하게 분포한다고 가정하였다.

본 연구에서는 길이 $X=200\text{m}$, 폭 $Y=100\text{m}$ 인 수역을 대상으로 하였으며 수로의 중앙부 $X=100\sim 120\text{m}$ 구간에 원형연직파일군이 투과성 방파제 형식으로 놓여있는 경우를 대상으로 하였으며 계산조건으로서 수심 $h=5.0\text{m}$ 인 일정 수심의 해역 상에 주기 $T=5.0\text{sec}$, 입사파고 $H_0=0.4\text{m}$ 의 파랑이 입사한다는 조건을 기본으로 하여 파랑의 전파과정을 검토하였다. 이때 저면마찰계수는 $f_0=0.01$, 수평확산계수는 $A_h=0.05\text{m}^2/\text{s}$, 원형파일의 항력계수 $C_D=1.0$, 파일의 직경은 20cm 그리고 파일의 개수

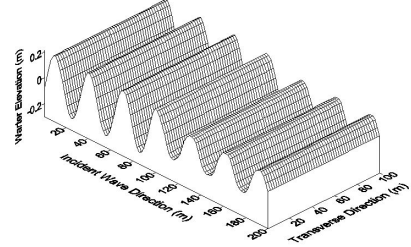
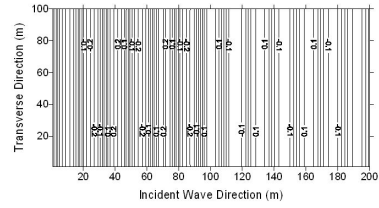


Fig. 2 Wave propagating with vertical cylinders

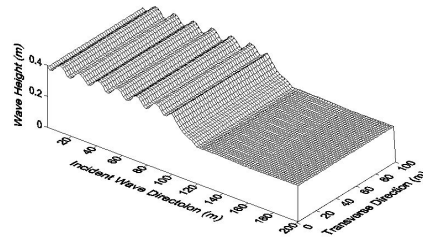
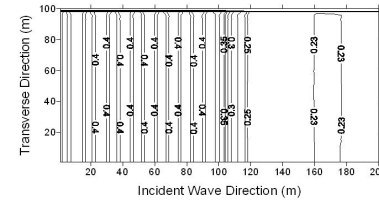


Fig. 3 Wave height distribution with vertical cylinders

는 $N=8\text{개}/\text{m}^2$ (파일밀도 $D=25.12\%$)를 기본으로 하여 수치계산을 수행하였다. 그리고 격자의 크기는 $\Delta x = \Delta y = 1.0\text{m}$, $\Delta t = 0.025\text{s}$ 로 하였으며 정수상태에서 정상상태에 도달하는 10주기동안 계산을 수행한 후의 결과를 사용하였다.

Fig. 2에서는 수역 내를 전파하는 파랑의 수면변위도를 도시하였으며 그림에서 보듯이 수역의 중앙부에 위치한 연직파일군 영역($X=100\sim 120\text{m}$) 구간을 지나면서 파랑의 변위가 감소하여 나타나고 있다. 그리고 Fig. 3에서는 수역내에서의 파고분포도를 나타내었다. 파고분포도에서 알 수 있듯이 수로 중앙부에 위치한 파일군에 의해 구조물이 위치하고 있는 $X=100\sim 120\text{m}$ 를 지나면서 파랑의 감쇠효과가 급격히 나타나고 있음을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 구조물영역 전면부에서는 수역의 중앙부에 위치하고 있는 구조물에 의해 미소하나마 반사파의 효과가 나타나고 있으며 $X=120\text{m}$ 이후의 수역에서는 파일군을 통과한 전달파의 특성을 보여주고 있다.

그리고 Fig. 4 에서는 수역을 입사하는 파랑의 진행방향(x

방향)의 위치에 따른 파고 분포의 변화를 횡단방향으로 도시하였다. 그림에서 보듯이 x 방향으로 파랑이 진행해 감에 따라 위치에 따른 파고의 감쇠효과가 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히 식생이 존재하는 $X=100\sim 120\text{m}$ 를 지나가는 동안 급격한 파고감쇠가 나타나며 $X=120\text{m}$ 위치 이후에는 거의 파고의 변화가 나타나지 않고 있는 투과파의 특성이 나타나고 있어, 연직 원형 파일군이 존재하는 경우 파랑의 저감효과를 수치해석을 통해 재현할 수 있었다.

Fig. 5에서는 수로의 중앙부에 원형파일의 개수 N 가 4, 6, 8, 12 및 $16\text{개}/\text{m}^2$ 로 변화하는 경우에 x 방향에 따른 파고의 감쇠효과를 나타내었다. 이때 단위면적당 파일이 차지하는 비율인 파일밀도 D 는 각각 12.56, 18.84, 25.12, 31.40, 37.68 및 50.24%에 해당하며 $x=100\sim 120\text{m}$ 에 원형파일군 방파제가 위치하고 있는 경우 수역의 중앙부 ($y=50\text{m}$)에서의 파고분포도를

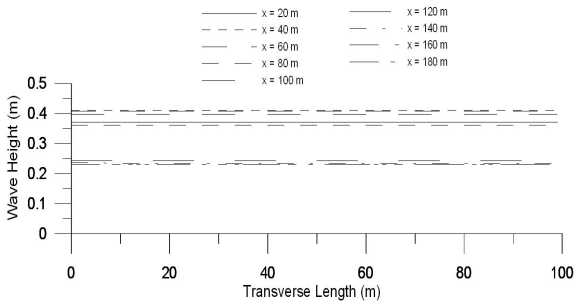


Fig. 4 Lateral wave height distribution

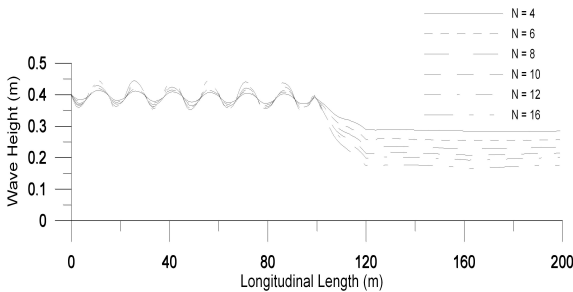


Fig. 5 Longitudinal wave height distribution

도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 파일밀도가 증가함에 따라 파일군 후면부($x=120\text{m}$ 이후 수역)에서 파고감쇠의 효과가 크게 나타나고 있으며 특히 파일군이 존재하는 영역내에서 파고감쇠의 경향이 증가하고 있음을 보여주고 있다. 즉 $N=4\text{개}/\text{m}^2(12.56\%) \sim 16\text{개}/\text{m}^2(50.24\%)$ 인 경우에 파일군영역을 투과한 투과율 K_t 가 0.75 ~ 0.40로 변화하여 파일 밀도가 증가함에 따라 투과율이 점차 감소하고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 연직파일군 밀도가 증가함에 따라 연직파일군 영역의 전면부에서 연직파일군에 의한 반사특성은 미소하나마 증가하고 있는 특성을 보이고 있어서 본 수치모형이 수역내 원형파일군이 존재하고 있는 투과성방파제에서의 파랑의 투과 및 반사특성을 대체로 잘 예측할 수 있음을 확인하였다.

3. 연직파일군의 수리실험

원형파일군으로 이루어진 투과성방파제의 파랑제어 특성을 수리실험을 통해 검토하기 위하여 길이 20.0m, 폭 0.7m, 깊이 1.25m의 규칙파 및 불규칙파의 발생이 가능한 2차원 단면실험용 조파수로를 사용하였다(Fig. 6). 본 조파수로는 피스톤형 조파장치를 통해 파랑을 발생하며 수로의 한쪽 끝에는 재반사파를 최소화하기 위한 소파장치로서 1:1.5의 부지포 경사투과제를 설치하였으며 조파관에서 발생한 실험파랑의 안정적인 유도를 위해 조파관에서 5m 떨어진 곳에 모형하상을 시작부 경사 1/10으로 2.0m를 설치하였고, 단면설치부분까지는 1/20경사로 6m를 설치하고 그 이후에는 수평상으로 제작하였다. 그리고 모형이 설치된 지점에서의 수심은 $h=0.25\text{m}$ 를 유지하도록 하였다.

원형파일군 투과성방파제의 실험 모형은 아크릴로 제작된 구형잠체를 실험수조의 바닥면과 일체가 되도록 고정하고 잠체 상에 직경 $d=20.0\text{mm}$ 의 원형플라스틱의 원주를 접착제로 부착하여 실험을 수행하였다. 실험은 원주군의 배치간격에 따라 원형파일 사이의 간격 $d_c = 20.0\text{mm}$ 와 40.0mm 인 경우에 대해 실험을 행하였으며 각 배치간격에 대해 원형파일군을 1열에서 4열로 각각 배열하여 실험을 수행하였다. 그리고 각 실험안에 대해 규칙파 실험에서는 입사파 주기(T)는 0.8, 1.0, 1.26, 1.42, 1.58, 1.90, 2.21 및 2.56초의 8개 주기에 대해서 또한 입

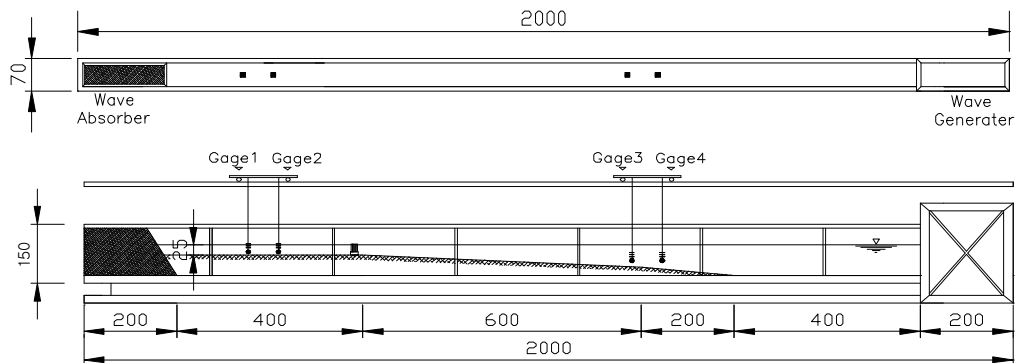


Fig. 6 Schematic sketch of 2-dimensional wave flume

사파고(H)는 2.5, 4.0, 5.0, 6.0 및 8.0cm인 5종의 파고에 대해 수리실험을 수행하였다. 투과성방파제 모형인 원형파일군의 배치형태는 각각의 열에 대해 $d_c=20.0\text{mm}$ 인 경우는 개구율 50%, 그리고 $d_c=40.0\text{mm}$ 인 경우는 개구율이 75%이며 원형파일군의 평면배열은 정3각형 형태의 엇갈림배치로 각각 1, 2, 3 및 4열로 설치하여 실험을 수행하였으며, 수리실험에 사용된 개구율 50% 및 75%의 4열배치에 대한 모식도는 Fig. 7에 각각 나타내었다.

수리실험에 사용된 일방향 불규칙파는 식 (12)와 같이 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1985)을 목표스펙트럼으로 설정하여 재현하였다.

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3}f)^{-4}] \quad (12)$$

여기서, $S(f)$ 는 주파수스펙트럼, $H_{1/3}$ 는 불규칙파의 유의파고, $T_{1/3}$ 는 유의파 주기이며, f 는 주파수를 나타낸다. 그리고 파랑의 제어특성을 파악하기 위해서는 다양한 해안수리학적 특성을 검토하여야 하나 방파제의 목적이 기본적으로는 항내 정온수역의 확보에 있으므로 본 수리실험에서는 투과율의 변화를 중점적으로 비교 검토하였다.

4. 수치모형과 실험결과와의 비교

직립 원형파일군으로 이루어진 투과성 방파제에 의한 파랑의 변형 및 감쇠를 지배하는 파라메타는 원형파일군의 배치형상과 직경, 개구율 등의 원형파일군의 특성과 파랑의 조건에 따라 결정되어지며 원형파일군의 특성이 주어진 경우 파형경사 H/L , 무차원파수 kh 와 같은 파랑의 조건이 파랑의 변형을 예측하는 요소가 된다. 따라서 본 연구에서는 무차원파수와 파형경사의 함수로서 파랑의 투과특성을 나타내었으며 수치모형과 수리모형실험의 결과는 다음 2가지에 대해 비교 검토하였다.

- (1) 원형파일군 전면이 75%개구율로 배치된 경우
- (2) 원형파일군 전면이 50%개구율로 배치된 경우

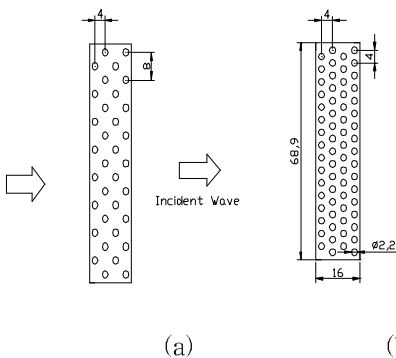


Fig. 7 Schematic sketch of circular cylinders breakwater for hydraulic model tests. (a) opening ratio 50%, 4 rows (b) opening ratio 75%, 4 rows

그리고 개구율 50%에 대한 (2) 실험안의 연직원주군에 대해서 각각 1열에서 4열까지의 배치안에 대해 수치실험결과와 수리모형실험결과를 서로 비교 검토하였다.

Fig. 8 과 Fig. 9 에는 원주군이 정3각형을 이루는 엇갈림격자로 배치되어 있는 경우 개구율 75%의 연직 원주군이 각각 1열에서 4열까지 배치될 때 파랑의 투과율을 파형경사 H/L 과 무차원 파수 kh 의 관계로 도시하였다. 이때 단위면적당 원주군이 차지하는 비율인 파일밀도 D 는 개구율 75%인 경우에 원주군을 각각 1열에서 4열까지의 배열에 따라 3.10%, 5.86%, 8.96% 및 11.72%에 해당하며, 개구율 50%인 경우에는 각각의 배열에 대해 파일밀도 D 는 각각 5.86%, 11.37%, 17.24% 및 23.44%에 해당한다.

Fig. 8에는 개구율 75%의 투과성방파제에 대한 투과율의 변화를 파형경사(H/L)에 대해 나타내었으며 그림에서 알 수 있듯이 원형 원주군이 1열(파일밀도 $D=3.10\%$)에서 4열(파일밀도 $D=11.72\%$)로 증가함에 따라 원형원주군의 투과성방파제를 통과하는 파랑의 투과율이 점차 감소하고 있는 경향을 보이고 있다. 특히 4열 배열인 경우 파고 감쇠효과가 나타나 평균투과율은 약 0.6정도로 나타나 파고의 감쇠특성이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 파형경사가 작을 수록 K_t 의 변동폭이 크게 나타나고 있으며 이같은 경향은 다양한 실험파고와 주기에 의한 실험결과에 의한 것으로 판단되며, 파랑저감은 입사파랑이 원주군의 투과성 방파제를 통과하는 동안 수면적의 축소와 원주군에 의한 마찰효과에 의해 나타나는 것으로 확인하였다.

그리고 Fig. 9 에는 개구율 75%의 투과성방파제에 대한 투과율의 변화를 무차원파수(kh)에 대해 나타내었으며 그림에서 알 수 있듯이 원형 원주군의 파일밀도 D 가 증가함에 따라 투과성방파제를 통과하는 파랑의 투과율도 전체적으로 감소하고 있는 경향을 보이고 있다. 본 실험결과에서도 파형경사의 경우와 유사하게 무차원파수에 대해 투과율의 변동이 크게 나타나고 있으며 전체적인 경향은 무차원파수가 증가함에 따라 미소하나마 투과율이 감소하는 경향을 보이고 있다.

그리고 Fig. 10에는 개구율 50%의 연직 원형원주군이 각각 1열에서 4열까지 배치될 때 파랑의 투과율을 파형경사 H/L 의 함수로 수리실험 결과와 함께 수치실험 결과를 비교·도시하였다. 실험 결과 그림에서 알 수 있듯이 원형 원주군이 1열에서 4열로 증가함에 따라 점차 원주군을 투과하는 투과율이 감소하고 있는 경향을 보이고 있다. 그리고 3열 및 4열 배열인 경우 평균투과율이 0.6이하로 나타났으며 특히 4열배열인 경우에는 투과율이 0.5정도로 나타나 원주 열의 증가에 따라 파에너지 감쇠효과가 나타나고 있음을 확인하였다. 본 연구에서 적용된 수치실험의 결과 수리실험과 비교하여 타당한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 11에는 개구율 50%의 연직 원주군에 대한 투과율을 무차원파수 kh 의 함수로 도시하였으며, 실험 결과 원주군이 2열에서 4열로 증가함에 따라 투과율은 감소하고 있으며 특히 kh 가 1.0부근에서 수치실험결과 투과율이 상대적으로 감소하고 있는 것으로 확인되었다.

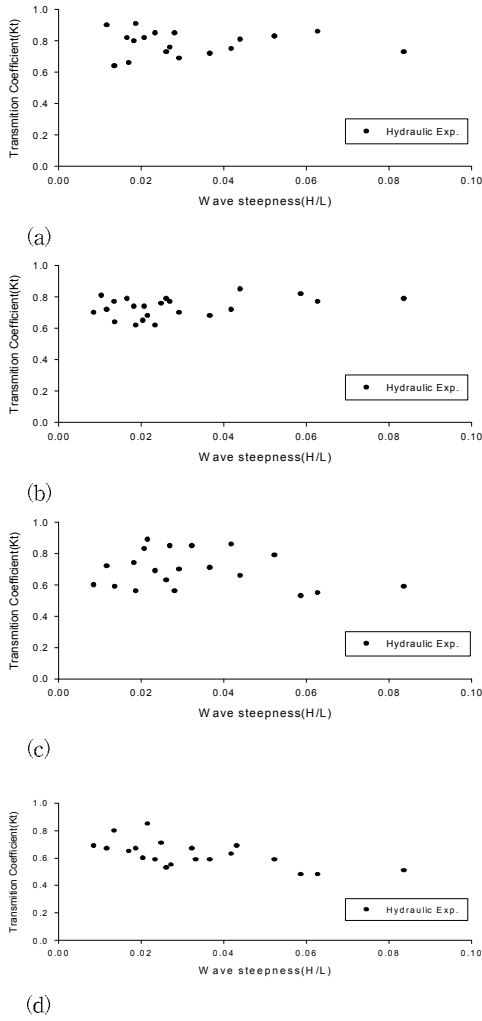


Fig. 8 Transmission coefficient K_t as a function of wave steepness (H/L) with circular cylinders (opening rate 75%) (a) 1-row (b) 2-rows (c) 3-rows (d) 4-rows

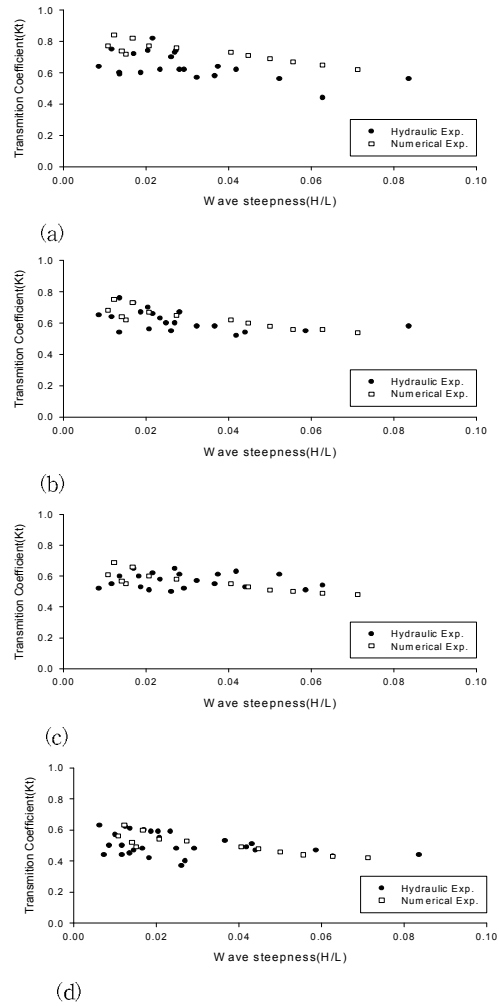


Fig. 10 Transmission coefficient K_t as a function of wave steepness (H/L) with circular cylinders (opening rate 50%) (a) 1-row (b) 2-rows (c) 3-rows (d) 4-rows

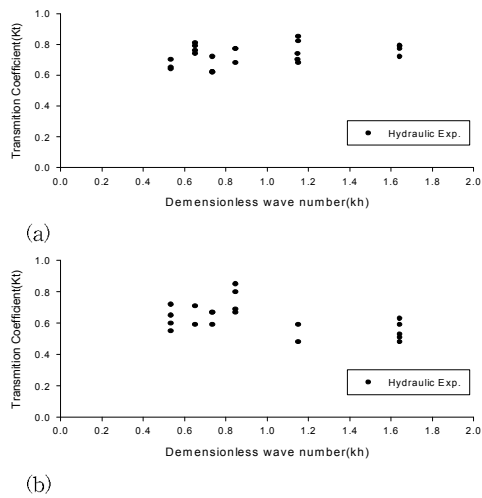


Fig. 9 Transmission coefficient K_t as a function of kh with circular cylinders (opening rate 75%) (a) 2-rows (b) 4-rows

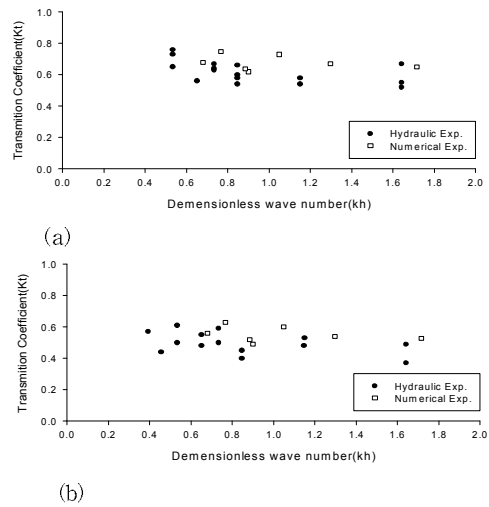


Fig. 11 Transmission coefficient K_t as a function of kh with circular cylinders (opening rate 50%) (a) 2-rows (b) 4-rows

5. 결 론

본 연구에서는 다열의 연직 원형파일군이 존재하는 투과성방파제의 파랑제어효과를 검토하기 위하여 수치모형을 개발하였으며 그 적용성을 파악하기 위하여 수리실험을 수행하여 비교·검토하였다. 수치모형은 연직파일군에 의한 저항과 저면에서의 마찰특성을 고려하며 특히 파일군의 저항은 파일군의 밀도, 직경 및 배치 등에 따라 변화하므로 이들을 정식화하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과 단위면적당 파일군의 개수나 파일의 밀도가 증가함에 따라 투과율이 감소하고 있으며 연직파일군 전면부에서는 미소하나마 반사율이 증가하고 있는 특성을 보이고 있어서 본 수치모형이 수역내 원형파일군으로 이루어져 있는 투과성방파제에서의 파랑의 투과 및 반사특성을 대체로 잘 예측할 수 있음을 확인하였다. 그리고 본 수치해석의 타당성을 확인하기 위하여 수리실험을 수행하여 연직파일군에 의한 파랑의 제어특성을 검토하였다. 수리실험에서는 개구율 50%와 75%에 대해 수행하였으며, 실험결과는 파형경사(H/L)와 무차원파수(kh)의 함수로 나타내었으며 개구율이 감소함에 따라 즉 파일밀도가 증가함에 따라 투과율이 감소하고 있음을 확인하였다. 특히 개구율 50%인 경우 원주군이 1열에서 4열로 증가함에 따라 원주군을 통과하는 파랑의 투과율이 점차 감소하고 있는 경향을 보이고 있다. 특히 4열 배열인 경우 파고 감쇠효과가 나타나 평균투과율은 0.5정도로 파고의 감쇠특성이 잘 나타나고 있음을 알 수 있었으며, 이같은 결과는 수치실험결과와 비교하여 대체로 타당성있는 결과로 판단되었다.

본 연구에서는 원형파일군이 있는 투과성방파제의 투과 특성에 관해 연구하였으며 실제 현장에서의 적용성을 위해서는 평면수리실험이나 실제 현장에서의 관측결과와의 비교 검토가 요구된다. 그리고 파일 전면에 작용하는 파력과 모멘트 그리고 처오름 높이에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 (주)포스코건설의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 서경덕, 지창환 (2006). "다열 커튼월 파일 방파제에 의한 규칙 파의 반사 및 투과", 한국해양·해양공학회지, 제18권, 제2호, pp 97-111.
- 이상화, 장은철, 정동화 (2007). "다원주 파일군 구조물에 의한 항내정온도 향상에 관한 실험적 연구", 한국해양·해양공학회지, 제19권, 제1호, pp 66-72.
- 이성대 (2006). "연안해역에서의 수변식생에 의한 파랑변형에 관한 수치해석", 한국해양공학회지, 제20권, 제1호, pp 63-68.
- 정신태, 이달수, 조홍연, 오영민 (2004). "잠제가 설치된 유공형 해수교환방파제의 도수량 특성분석", Ocean and Polar Research, 제26권, 제3호, pp 465-473.
- 조일형, 고혁준 (2007). "파일방파제의 소파성능 해석", 한국해양공학회지, 제21권, 제4호, pp 1-7.
- Akeda, S., Yamamoto, Y., Kimura, K. and Mifune, S. (1998). "Seawater Exchange on Armored Caisson Breakwater with Intake Holes", Journal of Ocean Development, Vol 14, pp 531-534.
- Goda, Y. (1985). Random Seas and Design of Maritime Structures, University of Tokyo Press.
- Suh, K.D., Shin, S. and Cox, D.T. (2006). "Hydrodynamic Characteristics of Pile-Supported Vertical Wall Breakwaters", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol 132, No 2, pp 83-96.

2008년 1월 15일 원고 접수

2008년 6월 10일 최종 수정본 채택