

## 부방파제를 이용한 원전항의 정온효과 수치해석

이정렬<sup>1\*</sup> · 송무석<sup>2</sup>

<sup>1</sup>성균관대학교 토목환경공학과

<sup>2</sup>홍익대학교 조선해양공학과

# A Numerical Study on the Effectiveness of a Floating Breakwater in Wonjeon Port

Jeong-Lyul Lee<sup>1\*</sup> and Museok Song<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

<sup>2</sup>Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Hongik University, Jochiwon 339-701, Korea

### 요 약

특정 해역에 부방파제를 설치하는 경우 예상되는 정온도의 평가를 위한 수치해법을 제안하고, 이를 바탕으로 마산 부근의 원전항에 설치예정인 부방파제의 효과를 검토하였다. 수치모형은 항 내 정온도를 평가하는 데 널리 사용되는 환경사 방정식을 이용하였고 산란 항을 도입하여 부방파제와 같은 폭이 얇은 구조물에 의한 산란 파를 반영하도록 하였다. 부방파제의 도입이 결정된 동방파제의 효과를 수치모의 하였고, 착저식으로 하는 경우와 비교하였다. 부방파제의 부분투과 등 구조물이 파랑에 미치는 영향을 적극적으로 고려하는 본 수치해법은 부방파제 효과의 정량적 평가에 효율적으로 활용될 수 있다.

**Abstract** – A numerical scheme is proposed which is applicable to the evaluation of wave field containing floating structures, and the method is utilized to estimate the effect of the floating breakwaters to be installed in Wonjeon port near Masan. The model is based on the mild-slope equation which is widely accepted for the calculation of wave modulation near shores and an additional term is introduced to consider the wave scattering associated with the thin floating structures such as floating breakwaters. The tranquility in Wonjeon port with the floating breakwater in the east side is calculated and compared with the one with a bottom-fixed breakwater. The present method is believed to provide an efficient way of quantitative measurement of the performance of floating breakwaters.

**Keywords:** floating breakwater(부방파제), mild-slope equation(환경사방정식), scattering(산란), tranquility(정온도)

### 1. 방파제 유형과 정온도 평가 수치기법

부방파제와 같은 수면 거치된 형태의 방파제는 주로 만이나 하구와 같이 파의 직접적인 영향을 받지 않는 해역에서 단파의 에너지를 효과적으로 차단하도록 적용 발전되어 왔다. 대부분의 만은 중력식 방파제의 자중을 견디기엔 너무 약한 지반을 갖고 있으므로 부방파제는 만 내의 파고를 적정수준으로 줄이기 위한 대체 기술로 사용된다. 일반 중력식 방파제와 달리, 수면 부유된 부방파제는 파랑 에너지가 집중되는 수면 가까이 방파제의 몸체를

두어 입사되는 파랑 에너지를 반사시킴으로써 대부분의 파가 항내로 투과되지 않도록 한다. 부방파제는 특히 항 내 수위를 외해와 분리시키지 않고 방파제 아래로 해수를 유통시켜 수질이 악화되는 것을 막기 때문에 해안환경의 관점에서 선호되고 있다(송무석 등[1998], 김도영 등[2000]).

수면 거치된 방파제와 같은 구조물에 의한 파의 산란은 이미 여러 저자들에게 의해 연구되었지만, 잘 알려진 바와 같이 선형 포텐셜 이론이라는 기초 안에서도 수학적으로 어려운 점들이 많다. 그래서 고정된 수직 판에 의하여 수면이 격리되는 산란파의 해석 시에도 전형적으로 이차원 영역에서 수행된다. 그러나 실지형에서 입사파는 그러한 방파제로 인하여 산란되고 후면에서 회절 및 굴

\*Corresponding author: jllee@skku.edu

절한 후 부두나 호안과 같은 항만구조물로부터 일부 파가 다시 반사되어 되돌아 나온다. 이러한 영향을 고려하기 위하여 기존의 파랑 모형에서 산란파를 효율적으로 처리할 수 있도록 하는 수치 해석적 시도가 최근에 이루어졌고, 이들을 정리하면 아래와 같다.

Sawaragi 등[1987]은 떠있는 물체 주위의 근역에 대한 3차원 그린함수모델과 원역에 대한 2차원 BIEM모델을 결합한 수치모델을 제안했다. 최근에는 Ohyama와 Tsuchida[1997]는 이전의 접근방법과 비교했을 때보다 더 계산효율을 높이기 위해 evanescent mode를 결합하여 환경사 방정식을 확장시켰다. 그러나 그들의 evanescent mode와 결합하는 환경사 방정식은 실지형에 적용하여 충분히 정확한 결과를 도출하기에는 여전히 꽤 많은 CPU 시간과 저장용량을 필요로 한다. 본 연구에서는 방파제의 두께가 얇다는 가정하에서 Lee와 Lee[2001] 그리고 Lee와 Lee[2003]에서 시도된 상당히 간단한 접근방법을 적용한다. 이 방법은 전통적인 환경사 방정식에 단지 방파제로 인한 산란 항을 추가하여 해석하는 진행 파 방법을 취한다. 여기서 산란항은 부방파제가 놓여도 부방파제를 가로질러 연속적인 자유수면 속도포텐셜의 경사에 의하여 결정된다. 따라서 산란파의 발생을 지배하는 evanescent mode는 단지 반사 및 투과율을 구하는 데에만 기여하게 된다. 이러한 방법은 구조물 주변에서 약간 다른 경향을 보여준다는 단점을 갖고 있지만 10보다 큰 evanescent mode를 함께 수행하는 기존의 방법에 비해 상당히 빠른 수치 모의를 보장할 수 있다는 장점이 있다. 또한 100보다 큰 evanescent mode를 부담없이 적용할 수 있으므로 오히려 더 중요한 산란파가 정확하게 모의된다는 장점을 갖고 있다.

반사 및 투과율에 의하여 결정되는 산란항을 이와 같이 evanescent mode의 계산과 분리한 또 다른 이유는 실제 방파제의 반사 및 투과 성능이 꼭 수학적으로 evanescent mode에 의하여 결정되지 않는다는 데 있다. 설치할 복잡한 형상과 기능을 갖춘 방파제의 단면실험을 통하여 반사 및 투과 또는 에너지 흡수 및 감쇠율을 얻은 후 파랑장에서 그로 인한 산란파의 모의가 이루어지는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 해수유통로가 있는 고정된 방파제뿐만 아니라 파랑에너지의 부분흡수 및 감쇠가 이루어지는 부방파제에도 적용될 수 있도록 하였다.

## 2. 환경사방정식

### 2.1 지배 방정식

Smith와 Sprinks[1975]는 식 (1)과 같은 시간 의존 환경사 방정식을 제안하였다.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) + (\sigma^2 - k^2 CC_g) \eta = 0 \quad (1)$$

여기서  $\eta$ 는 수면위치,  $C$ 는 파속,  $C_g$ 는 군속이며  $\sigma$ 는 각주파수,  $k$ 는 파수이다. 항 내에서는 직립 항만 구조물로 인하여 반사파가 우월하게 형성되므로 경계 조건을 효과적으로 처리하기 위하여 속도 벡터를 매개 변수로 두어 식 (1)을 분리한다. 운동학적 자

유수면경계조건을 이용하면  $\nabla \eta$ 는 자유수면에서 다음과 같이 정의되는 속도벡터  $\mathbf{u}$ 로 표현될 수 있다.

$$\nabla \eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \quad (2)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도이다. 식 (2)는 다음 식과 같이 변형된다.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + g \nabla \eta = 0 \quad (3)$$

식 (2)를 이용하면 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left( CC_g \frac{1}{g} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right) + (\sigma^2 - k^2 CC_g) \eta = 0 \quad (4)$$

식 (3)과 (4)는 Copeland[1985]의 파 방정식과는 달리 군속도로 파에너지가 전달된다. Madsen과 Larsen[1987]이 한 것도 마찬가지로 주기적인 운동을 소거하여 수치계산상의 효율을 취하기 위하여  $\eta = S \exp(i\sigma t)$ 으로  $\mathbf{u} = \mathbf{U} \exp(i\sigma t)$ 으로 두고 식 (3)과 (4)를 다음과 같이 정리한다.

$$\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} + 2i\sigma \frac{\partial S}{\partial t} + \nabla \cdot \left[ \frac{CC_g}{g} \left( \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + i\sigma \mathbf{U} \right) \right] - k^2 CC_g S = S_i \quad (5a)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + i\sigma \mathbf{U} + g \nabla S = \mathbf{U}_g \quad (5b)$$

여기서  $S_i$ 는 원천 항으로 입사파를 형성하고,  $\mathbf{U}_g$ 는 산란 항으로 다음 절에서 부연한다. 입사파를 발생시키는 원천 항은  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 의 격자 위에서 다음과 같이 입사파고  $H_i$ 의 항으로 주어질 수 있다.

$$S_i = \sigma C_g H_i \exp(ik \sin \theta_i y) \frac{\Delta S}{\Delta x \Delta y} \quad (6)$$

여기서  $\theta_i$ 는 입사파향이고,  $\Delta S$ 는 격자내부 입사파 전면의 폭이다. 위에서 보여지는 것처럼 (5a)와 (5b)가 결합된 미분방정식은 규칙파는 물론 불규칙파 입사 조건도 다룰 수 있어 현존하거나 앞으로 계획되는 새로운 항구에서 정온을 파악하기에 가장 효율적인 공학적인 수단으로 활용될 수 있다.

### 2.2 산란 항

부 방파제는 산란파를 형성하기 때문에 파를 제공하는 또 다른 파랑 원천으로 생각할 수 있다. 식 (5a)에서 주어진 산란 항이 만약  $\mathbf{R}$ , 만큼의 산란 파를 제공한다고 할 때 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{U}_s = 2C_g^r \frac{\Delta S}{i \Delta x \Delta y} \mathbf{U} \quad (8)$$

여기서  $\Delta S$ 는 격자 안에 방파제가 차지하는 길이이다. 방파제 위치에서 산란되는 파랑은 방파제로부터 양 방향으로 전파될 것이다. 산란파  $\mathbf{R}$ ,는 방파제에서 방파제를 가로지르는 유속성분  $\mathbf{U}$ 와 의 관계로부터 다음과 같이 표현된다.

$$U_s = 2C \frac{r}{t} \frac{\Delta s}{\Delta x \Delta y} U \quad (9)$$

여기서  $r$ 은 복소수의 반사율이고  $t$ 는 복소수의 투과율이다. 에너지 손실이나 흡수가 없어 에너지가 보존 되는 경우  $r/t = \pm i|r|/|t|$ 이 된다 (Mei[1983]). 완전해와 비교하였을 때 음의 부호가 취해져야 한다. 그렇게 해서 전형적인 환경사 방정식에 추가 항을 넣어 부방파제로 인한 산란 파의 영향이 반영되었다. 이 방정식은 계산상으로 효과적일 뿐만 아니라 일정하지 않은 수심에서도 비교적 얇은 구조물로부터의 파랑의 산란을 적용할 수 있다.

### 2.3 유한차분 수치해법

지배방정식은 음해법으로 유한차분되어 근사분해기법(approximate factorization techniques)을 이용하여 해석되었다. Tridiagonal matrix를 형성하도록 교차격자를 구성하고 그 것들은 tridiagonal 알고리즘을 사용하여 구한다. 이 알고리즘은 그 효율성이 뛰어나기에 유한 차분식을 푸는데 많이 사용된다. 측방경계조건과 부분적으로 반사가 일어나거나 투과되는 조건에서의 경계 처리 등 더 자세한 설명은 Lee[1998]에 기술되어 있다.

### 3. 부방파제에의 적용

식 (9)에서  $r/t$ 는 부방파제의 파랑 제어 특성으로부터 결정되는 것으로 수학적 모형으로부터 직접 산정할 수 있으나 대부분의 부방파제는 수학적으로 산정하는 데 한계가 있으므로 본 절에서는 주어진 파랑 조건 하에서  $|r|$ 과  $|t|$  또는  $|r|$ 과 에너지 흡수나 소산  $\epsilon$ 가 관측된 상태에서 복소수 값으로서의  $r/t$ 를 산정하는 방법에 대하여 기술한다. 부방파제는 고정되어 있지 않아 파랑 작용 하에서 운동을 함으로써 파랑 에너지를 흡수하고 또 파랑 에너지를 감쇠 시키는 역할도 하는 데 이로 인한 파랑 에너지 소산 계수  $\epsilon$ 는 다음과 같이 복소수의 반사계수와 투과계수로부터 산정될 수 있다.

$$r_{-}t_{+} + r_{+}t_{-} = \epsilon \quad (11)$$

여기서 ( ) $_{+}$ 는 공액 복소수를 나타내고 +기호의 하첨자는 좌측에서 우측으로 진행하는 파랑 전파시의 계수라면 -기호는 그 반대방향인 우측에서 좌측으로 진행하는 파랑 전파시의 값들이다. 식 (11)에  $t_{+}r_{+}$ 를 곱하면

$$|t_{+}|^2 r_{+}r_{+} + |r_{+}|^2 t_{+}t_{+} = \epsilon t_{+}r_{+} \quad (12)$$

식 (12)를  $t_{+}t_{+}$ 로 나누면,

$$|t_{+}|^2 \frac{r_{+}r_{+}}{t_{+}t_{+}} - e \frac{r_{+}}{t_{+}} + |r_{+}| = 0 \quad (13)$$

여기서 투과계수에 관한 한 구조물의 대칭성과 관계없이  $t_{-}t_{+} = r(r_{+})$ 이지만 반사율은 대칭구조의 경우만  $r_{-} = r_{+} = r$ 이 성립된다. 따라서 대칭 구조라면 식 (13)은 다음과 같이 된다.

$$|t_{+}|^2 \frac{r^2}{t^2} - e \frac{r}{t} + |r_{+}| = 0 \quad (14)$$

이 식의 해는 다음과 같다.

$$\frac{r}{t} = \frac{e/2 \pm \sqrt{e^2/4 - |r_{+}|^2 |t_{+}|^2}}{|t_{+}|^2} \quad (15)$$

소산이 없는 특별한 경우에는 식 (15)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{r}{t} = \pm i \frac{|r_{+}|}{|t_{+}|} \quad (16)$$

식 (15)와 (16)에 있는 +와 -부호 중 이론적인 완전 해 (Ursell[1947])와 비교하여 '-' 부호가 선정된다. 식 (15)를 흡수나 손실이 없을 때의  $|r_{+}|$  and  $|t_{+}|$ 로 표현하는 것이 편리할 경우가 있으므로  $|r_{+}|^2 + |t_{+}|^2 + \epsilon = |r_{+}|^2 + |t_{+}|^2 = 1$  라는 관계를 이용하면 다음과 같이 할당될  $\epsilon$ 이라는 새로운 변수를 도입하여 아래 관계를 수립할 수 있다.

$$|r|^2 = |r_{+}|^2 + \epsilon - \epsilon/2, \quad |t|^2 = |t_{+}|^2 - \epsilon - \epsilon/2 \quad (17)$$

따라서  $\epsilon=0$ 는 에너지 흡수 또는 소산이 반사와 투과계수에 동등하게 할당됨을 의미한다. 반면,  $\epsilon = \epsilon/2$ 는 모든 에너지 소산은 파가 전파될 때 발생한다는 것을 의미한다. 식 (15)에 (17)을 대입하면, 다음과 같다.

$$\frac{r}{t} = \frac{e/2 - i\sqrt{(|r_{+}|^2 + \epsilon)(|t_{+}|^2 - \epsilon)} - \epsilon/2}{|t_{+}|^2 - \epsilon - \epsilon/2} \quad (18)$$

$|r_{+}|$  and  $|t_{+}|$ 는 일반적으로 고정된 구조물의 경우 속도포테셜을 이용한 기존의 수학적인 해로부터 구할 수 있다. 부방파제의 경우 할당율이 보통 어떻게 주어지는 지 연구된 바가 없어 반사와 투과계수에 동등하게 할당되는  $\epsilon=0$ 의 경우가 되지 않을 까 추정되나 고정판의 경우 소산이 반사율에 미치는 영향이 없으나 투과율의 감소에 전적으로 영향을 미치는 것으로 관측되었으므로 이 된다.

### 4. 수치해법 검증

Fig. 1은 에너지가 보존되는 경우에 식 (16)에 반사율을 대입하고 산정된 반사율을 동시에 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 0부터 1까지 가능한 영역에서 서로 일치하고 있음을 보여주고 있다. 그림 Fig. 2와 3은 파랑 에너지가 보존되는 고정 방파제에 대하여 반사율 0.7인 경우 반사파와 입사 또는 투과 파의 성분을 분해하여 도시한 것이다. Fig. 2는 파형, Fig. 3은 파고를 도시한 것이다.

Fig. 4와 같이 여러 개의 방파제가 연속하여 위치하는 경우 투과된 파가 다시 반사되기도 하여 수학적인 해를 구하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 심해 파에 대한 이론적인 해인 Evans and Morris (1972)의 결과를 수치 결과와 비교하여 본 모형의 수행능력을 평가하였다. 3개의 수면 거치 고정 방파제로 입사하는 파의 전체 반사율 및 투과율이 Fig. 5에 도시 되었다. 이론 및 수치 해의 결과

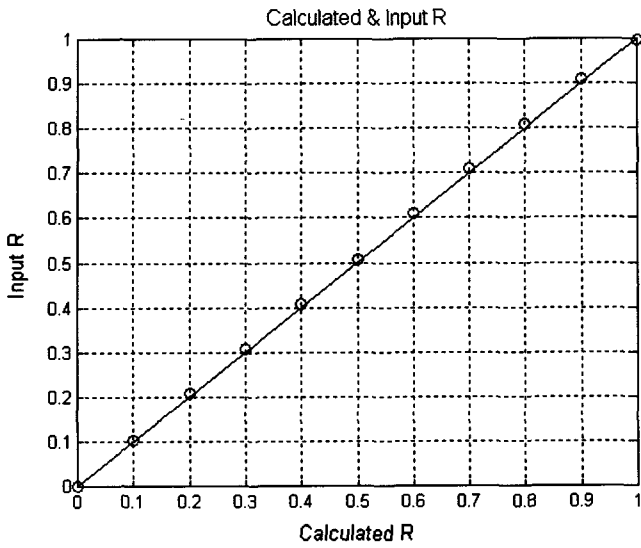


Fig. 1. Evaluation of the calculated reflection rates.

가 상당히 일치하고 있으므로 부방파제가 위치하여 투과 또는 회절된 파랑이 다시 되 반사되어 나오는 경우에 대하여도 본 수치 모형이 적용될 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 6은 Stiassnie et al.[1984]의 에너지 손실에 대한 수식을 이

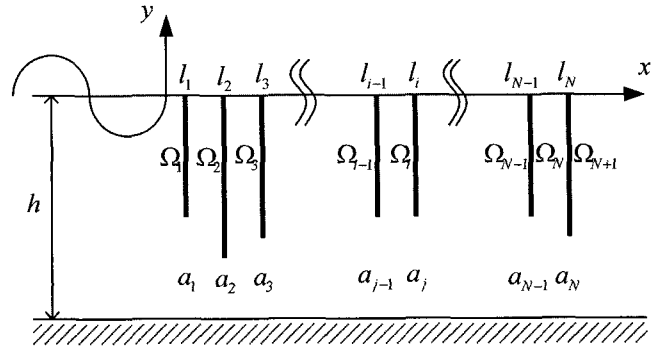


Fig. 4. Regions with multiple breakwaters.

용하여 파고 5 cm와 10 cm 두가지 경우에 대한 에너지 손실에 대하여 파의 반사와 전파의 모델 수행 결과를 보이고 있다. 두 경우에 대해  $\epsilon=e/2$ 을 사용했기 때문에, 그림에서 진폭이 증가함에 따라 반사계수에 대한 이론결과와 수치결과 양쪽 모두 변화가 없는 반면, 투과계수는 에너지 손실이 커지는 경우 더욱 감소함을 보이고 있다. 여기서는 파랑이 방파제에 직각으로 입사하는 경우의 결과만을 제시하였으나 직각으로 입사하지 않더라도 충분히 정확화에 근접하는 결과를 제공한다.

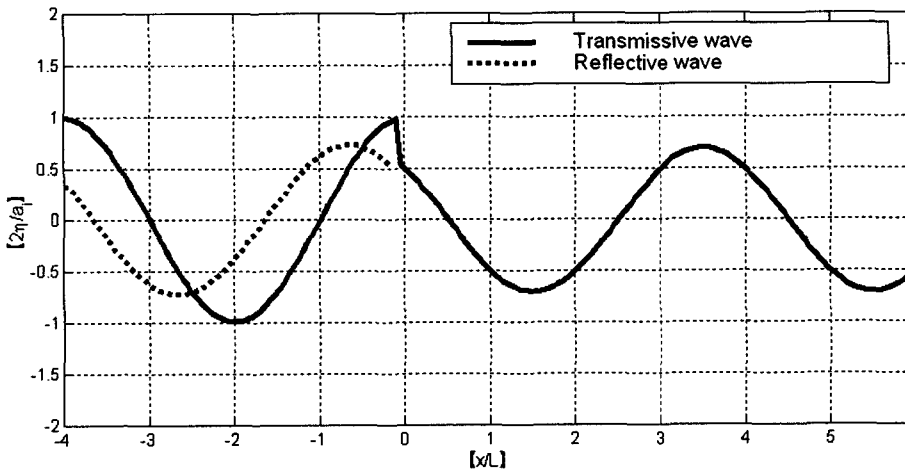


Fig. 2. Phases of the dimensionless wave components with a breakwater at  $x=0$ .

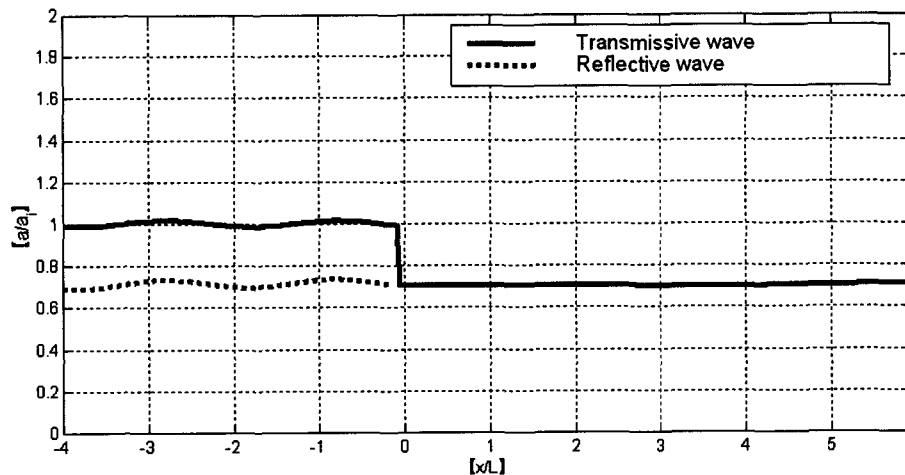


Fig. 3. Wave heights of the wave components with a breakwater at  $x=0$ .

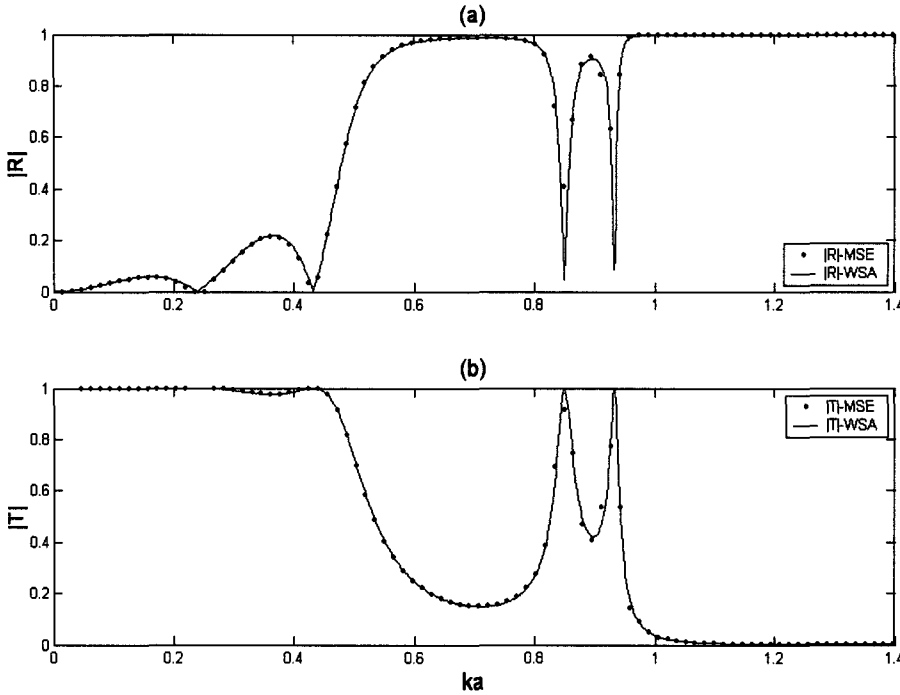


Fig. 5. Comparisons with the analytic solutions of Evans and Morris[1972].

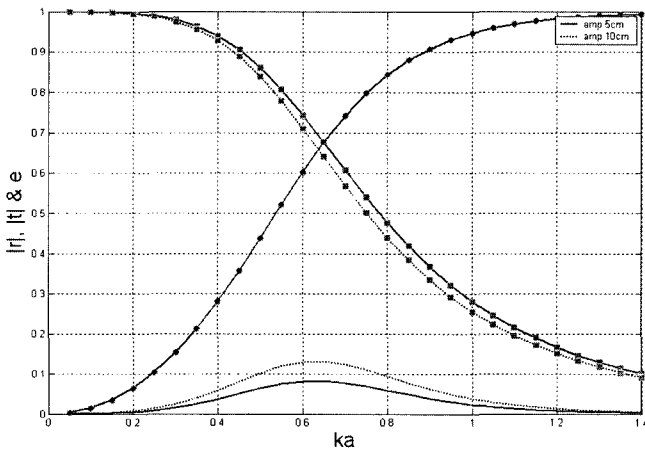


Fig. 6. Wave components and energy with energy loss model. Solid lines are for 5 cm amplitude and dotted lines are for 10 cm wave amplitude. Red and blue squares are for transmission and reflection, respectively.

### 5. 원전항해역 정온도 수치시험

개발된 수치기법을 이용하여 현재 부방파제의 설치가 계획중인 마산만 내의 원전항의 정온도를 평가하였다. Fig. 7은 마산만과 원전항의 지형을 보이고 있고 Fig. 8은 원전항에 설치 예정인 부방파제와 확장 계획중인 착저식 방파제의 구성을 보이고 있다.

수치 모형은 격자간폭 10 m의 270×205격자의 격자망에서 수행하였으며 진해만 서측 그리고 마산만 입구 동측에 위치한 원전항 주변으로 계산 영역 및 등수심도는 Fig. 9과 같으며 3차원 수심도는 Fig. 10에 도시하였다. 해안선 근처를 제외하고 10-30 m 정도의 얇은 수심을 유지하고 있다.

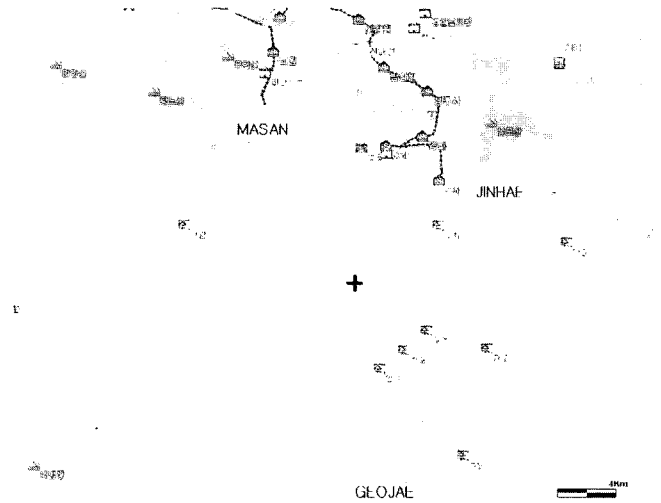


Fig. 7. Topography of Masan bay. Wonjeon port is marked with a cross.

계획되고 있는 부방파제는 원전항 동쪽에 수심 10 m에 위치하고 있으며 길이는 250 m이다. 수치 모의는 8초의 주기를 갖는 동쪽에서 유입되는 입사파에 대하여 수행되었다. 방파제의 제어 능력은 주로 주기, 파향에 따라 달라지지만 본 연구에서는 착저식과 투과율 25% 및 50%에 대한 부방파제의 정온 효과를 검토한다. 임의로 에너지 흡수와 손실을 합하여 30%의 에너지 손실이 발생한다고 가정하였다. Fig. 11~13은 동방파제 주변 영역에서의 파고 분포를 Fig. 14~16에서는 위상 변화를 보여주고 있다. 북동측 코너에서 수심이 상대적으로 얕으므로 굴절이 심하게 일어나 주어진 파향에 대하여 동방파제 아래에서 파고가 집중되는 현상을 보이고 있다. 따라서 상대적으로 북측과 남측에서 파고가 낮아지는 경향을 보이고 있다. 착저식의 경우 방파제 후면에 파랑이 완전

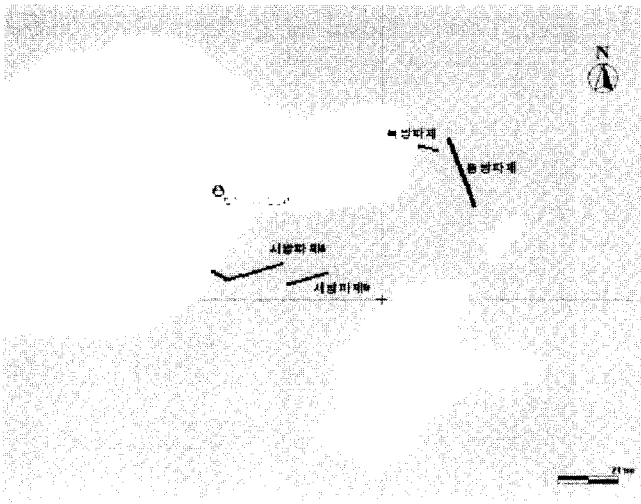


Fig. 8. Wonjeon port with breakwaters. East breakwater is floating type.

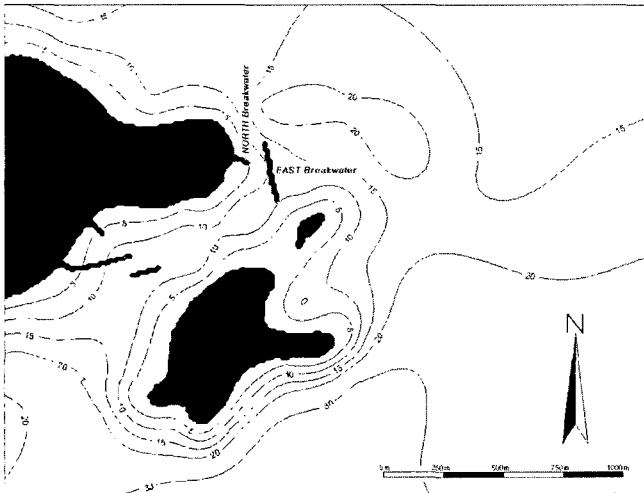


Fig. 9. Bathymetric contours near Wonjeon port.

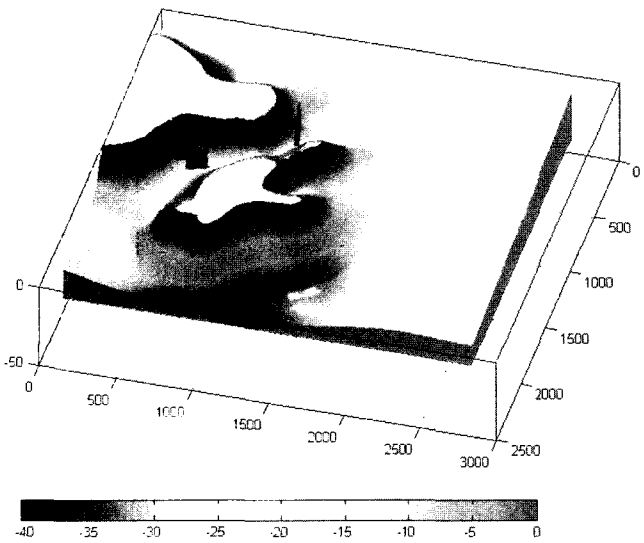


Fig. 10. Three-dimensional view of the area with the breakwaters.

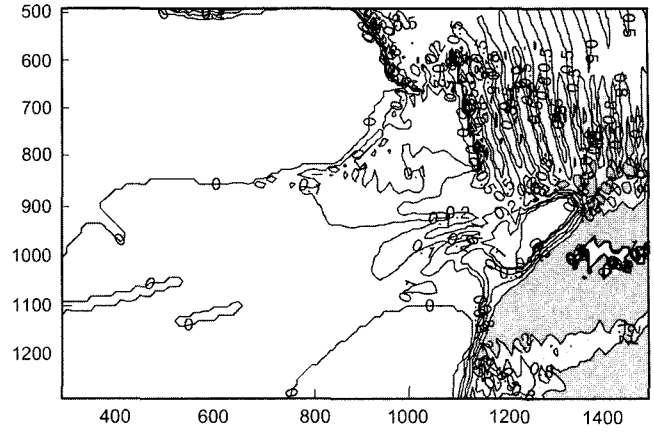


Fig. 11. Wave heights distribution with the breakwaters all fixed.

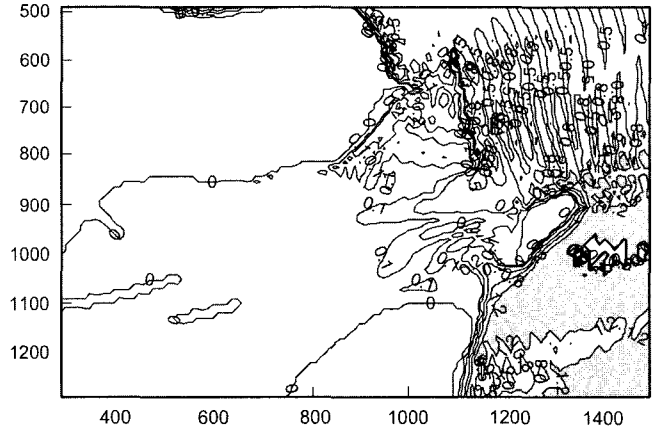


Fig. 12. Wave heights distribution with the east side floating breakwater of 25% transmission rate.

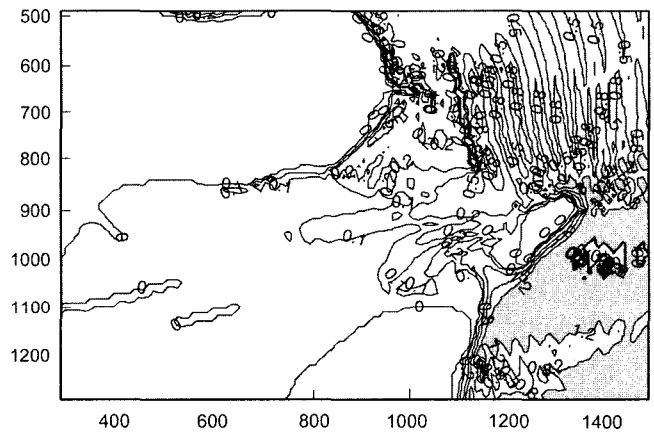


Fig. 13. Wave heights distribution with the east side floating breakwater of 50% transmission rate.

차단되므로 항 내가 상당히 정온하며 방파제 양단으로 회절 현상이 두드러지게 나타나고 있다. Fig. 13 같이 상대적으로 많은 파를 투과하는 경우(50%)는 예상대로 항 내가 그다지 정온하지 못한 결과를 보이고 있으며, Fig. 16에서 보는 바와 같이 회절 현상이 뚜렷하지 않다.

## 6. 결 론

이상에서 부방파제를 도입하는 경우 항만의 지형, 수심변화를 고려하여 정온도를 평가할 수 있는 수치해법을 개발하고 이를 실험역에 적용하여 그 실용성을 평가하였다. 수치시험을 위하여 현재 부방파제의 도입이 결정된 원전항 동방파제의 효과를 수치모의 하였다. 부방파제의 효능을 확인하기 위하여 착석식에 대하여도 수치계산 하였으며 부방파제의 경우 25%, 50% 투과율에 대하여 정온 효과를 검토하였다.

사용한 수치모형은 항 내 정온을 평가하는 데 널리 사용되는 완경사 방정식을 이용한다. 기존의 완경사 방정식은 파랑과 구조물의 상호작용을 반영하지 못하나 본 연구에서 소개되는 완경사 방정식은 산란 항을 도입하여 부방파제와 같은 폭이 얇은 구조물에 의한 산란 파를 반영하도록 하였다. 그리고 다중 방파제의 이론적 해석해와 비교하여 수립한 모형의 산란파 수행 능력을 검증하였다. 대부분의 부방파제가 해석적으로 손실 등을 포함한 파랑 제어 능력을 평가하기 힘들므로 투과율 및 에너지 흡수 또는 손실율을 직접 수조에서 관측하므로 이 들 자료를 이용하여 모형이 수행될 수 있도록 하였다.

부방파제의 부분투과 등 구조물이 파랑에 미치는 영향을 적극적으로 고려하는 본 수치해법은 앞으로 부방파제의 효과를 정량적으로 사전 평가하는데 매우 효과적으로 활용될 수 있다고 판단된다.

## 참고문헌

- [1] 김도영, 송무석, 김현주, 2000, "규칙파중 상자형 부유식 방파제 특성에 대한 연구", 대한조선학회논문집, 37권 3호, 45-56.
- [2] 송무석, 김도영, 조일형, 1998, "규칙파중 수면 근처에 고정된 상자형방파제의 특성에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 35권 2호.
- [3] Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction diffraction. *Proc. 13th Conf. Coastal Eng.*, 471-490.
- [4] Copeland, G.J.M., 1985. A practical alternative to the mild slope wave equation. *Coastal Engineering* 9, 125-149.
- [5] Evans D.V. and Morris, C.A.N., 1972. Complementary approximations to the solution of a problem in water waves, *J. Inst. Maths Applics* 10, 1-9.
- [6] Lee, J.L., 1998. Boundary treatment in a hyperbolic wave model. *J. the Korean Society of Civil Engineers* 18(II-6), 601-612.
- [7] Lee, J.L., and Lee, D.Y., 2003. Modeling of wave scattering by vertical barriers. *The Proc. of 13th International Offshore and Polar Engineering Conference*, ISOPE, Vol. 3, 773-780.
- [8] Lee, J.L., and Lee, K.J., 2001. Effect of a surface-piercing vertical thin breakwater to harbor tranquility. *The First Asian and Pacific Coastal Engineering Conference*, 186-195.
- [9] Madsen, P.A., and Larsen, J., 1987. An efficient finite-difference approach to the mild-slope equation. *Coastal Engineering* 11, 329-351.
- [10] Mei, C.C., 1983. *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*.

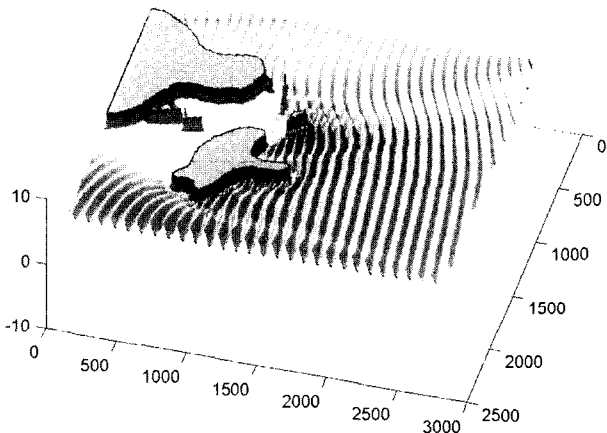


Fig. 14. Perspective view of the wave field with the breakwaters all fixed.

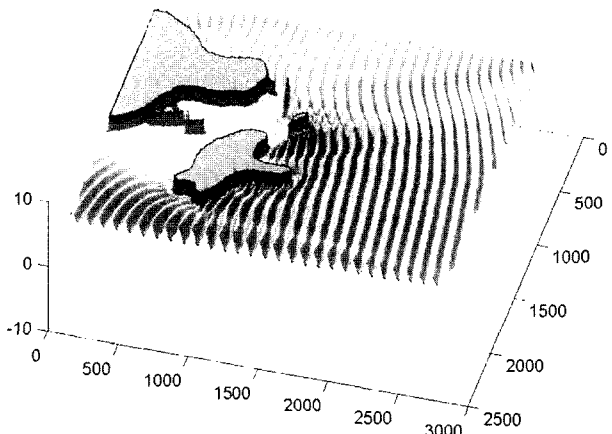


Fig. 15. Perspective view of the wave field with the east side floating breakwater of 25% transmission rate.

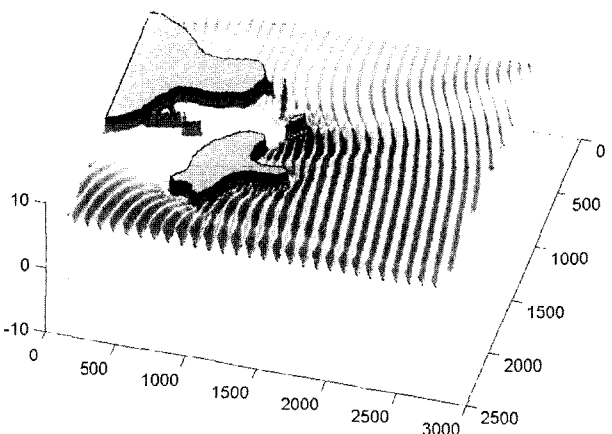


Fig. 16. Perspective view of the wave field with the east side floating breakwater of 25% transmission rate.

- Wiley, New York.
- [11] Ohyama, T. and Tsuchida, M., 1997. Expanded mild-slope equations for the analysis of wave-induced ship motion in a harbor. *Coastal Engineering* **30**, 77-103.
- [12] Sawaragi, T., Aoki, S., and Hamamoto, S., 1989. Analysis of hydrodynamic forces due to waves acting on a ship in a harbor of arbitrary geometry. *Proc. 8th Int. Conf. Offshore Mech. and Arctic Eng.*, ASME, 117-123.
- [13] Smith, R., and Sprinks, T., 1975. Scattering of surface waves by a conical islands. *J. Fluid Mech.* **72**, 373-384.
- [14] Stiassnie, M., Naheer, E., and Boguslavsky, I., 1984. Energy losses due to vortex shedding from the lower edge of a vertical plate attacked by surface waves. *Proc. R. Soc. Lond.* **A396**, 131-142.
- [15] Ursell, F., 1947. The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water. *Proc. Camb. Phil. Soc.* **43**, 347-382.
- 
- 2004년 11월 26일 원고접수  
2004년 12월 14일 수정본 채택