

투과 사석방파제 주변의 파랑장 해석 Wave Field Analysis around Permeable Rubble-Mound Breakwaters

곽문수* · 이기상** · 편종근***

Moon Su Kwak*, Ki Sang Lee**, and Chong Kun Pyun***

요 旨 : 본 논문은 사석이나 소파블록 투과방파제로 이루어진 항만의 평면파랑장 해석모델에 있어서 중요한 변수인 구조물 내부의 투과파 속도와 저항계수를 수치모델에 사용하기 편리하도록 정의하고, 시간의존 환경사방정식 모델에 이들 방법과 임의투과율 경계조건을 사용하여 투과 사석방파제 주변의 평면파랑장을 해석할 수 있는 모델을 제시하였다. 모델의 검증은 조파수로 내에서 투과제에 대한 단면 수리모형실험을 실시하여 구조물 전후면의 수위변동을 측정하고 모델의 결과와 시계열로 비교하였으며, 현지 항만의 소파블록 투과제에 대한 3차원 수리모형실험 결과와 모델의 결과를 항내 구역과고비로 비교하여 이루어졌다. 본 모델은 검증을 통하여 수리모형의 실험결과에 대한 재현성이 매우 좋음을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 투과방파제, 투과파 속도, 저항계수, 시간의존 환경사방정식, 임의투과율 경계조건, 투과파랑장 해석

Abstract □ In this study, a method that leads to make a simple decision on important parameters in analysis of wave field in permeable rubble-mound, block-mound breakwater, such as penetration velocity of incident waves and resistance coefficient, is introduced. A model that could analyze wave field of permeable breakwater in harbor, by applying these methods and arbitrary transmission coefficient boundary condition to a time-dependent mild-slope equation, was introduced. The verification of the model was done by carrying out 2-D physical model test on permeable breakwater, measuring the change in water surface elevation, comparing the computation result with time series, and comparing the result gained from the 3-D physical model test on permeable block-mound breakwater in an field harbor with the computation result in terms of regional wave height ratio in a harbor.

Keywords : permeable breakwater, velocity of wave transmission, resistance coefficient, time-dependent mild-slope equation, arbitrary transmission coefficient boundary condition, transmitted wave field analysis

1. 서 론

항만을 계획함에 있어서 방파제는 가장 대표적인 계획 요소로서 주된 목적은 외해로부터 내습하는 파랑을 차단하여 항내의 정온수역을 확보하는 것이다. 그러나 불투과성 방파제의 경우는 폐쇄성이라는 특성 때문에 연안에서의 물질순환 체계가 구조물 건설전의 환경과는 근본적으로 달라져 심각한 환경부작용이 초래되어 왔다. 육상으로

부터 유입된 유기물질이 외해로 확산되지 못하고 항내에 누적됨으로서 부영양화가 일어나며 항외에서의 산소를 포함하고 있는 해수의 유입이 차단됨으로서 항내는 만성적인 산소부족현상이 발생하게 된다. 현재 국내 대부분의 항만은 항내 해수의 자정능력 상실로 인하여 수질이 극도로 악화되어 생태계에 악영향을 미치고 있으며, 최근 이러한 현상을 개선할 목적으로 해수교환을 허용하는 투과성 방파제의 건설이 추진되고 있다. 투과성 방파제의 경

*명지전문대학 토목과(Department of Civil Engineering, Myongji College, 356-1, hongeun 3 dong, Seoul 120-848, Korea. moonsu@mail.mjc.ac.kr)

**삼안건설탄트(Harbor & Coastal Department, Saman Engineering Consultants)

***명지대학교 토목환경공학과(Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University)

우는 해수교환을 촉진하여 항내의 수질 개선에는 많은 도움을 주지만 한편으로는 항내에 전달파를 발생시켜 정온도에 나쁜 영향을 주기도 한다.

많은 연구자들이 투과성 방파제에 대하여 연구하였는데 주로 반사율과 투과율에 대하여 연구하였다. Sollitt와 Cross(1972) 그리고 Madsen(1974)은 구형 투과방파제에 의한 관성력과 저항력이 포함된 선형과 모델을 소개하였으며, 그 후 이들 모델을 기초로 하여 확장된 모델이 발표되었다(Madsen and White 1975; Suliz 1985). 근래에는 다양한 해안구조물에 적용 가능한 모델이 개발되었다(van Gent 1995; Liu *et al.*, 1999). 또한 박현주 등(2002)이 경사식 방파제의 수리특성을 해석할 수 있는 모델을 제시하였고, 정신택 등(2002)은 다열 부유식 방파제에 대하여 선형포텐셜 이론을 적용한 유한요소 모델을 소개하였다. 최근에는 실험실의 조파수로로 수치해석적으로 재현 가능하도록 개발한 수치파동수로(CADMAS-SURF)를 이용하여 다양한 투과제, 예를 들면 curtain wall, 몰수평판, L형 curtain wall, step-type 소파제 등에 대하여 수리특성을 검토하고 수리모형실험의 대체 가능성을 검토하였다(磯部 등, 1999; 沿岸開發技術研究센터, 2001). 그러나 이들 모델들은 연직2차원으로 재현되는 것으로서 주로 반사율과 투과율, 파압, 수위변동 등의 문제에 주안점을 두고 있으며 파의 회절등과 같이 평면파랑장의 해석에는 적용할 수 없다.

투과방파제에 의한 파의 회절문제를 다룬 연구는 많지 않다. Yu(1995)는 선형포텐셜 이론을 사용하여 투과방파제에 직각으로 입사했을 때의 회절문제를 해석할 수 있는 모델을 개발하였다. 이 모델은 임의입사각에 대한 모델로 확장되었으나(Yu and Togashi 1996; McIver 1999), 방파제의 폭이 입사파의 파장에 비하여 작아야 한다는 제약조건이 따른다. 그리고 Lynett *et al.*(2000)은 투과방파제에 의한 약비선형·약분산성 고립파의 회절문제를 해석할 수 있는 모델을 제시하고 실험을 통하여 검증하였다.

한편, 투과방파제 주변의 평면파랑장 해석에 대한 연구로서는 井島 등(1973)이 Green함수를 이용하여 방파제내의 유체운동에 대한 저항이 유속에 비례한다는 가정 하에 항내 파랑해석법을 제시하였고, 酒井 등(1978)은 투과방파제 경계의 선유량 결정에 있어서 임의반사를 경계조건을 투과파에도 동일한 방법으로 적용할 수 있도록 확장하고, 반무한방파제의 이론해와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다. 鈴木 등(1984)은 에너지평형방정식 모델에 투과제를 통과하기 직전의 격자에서 다음격자로 유

입하는 파 에너지를 투과율에 대응하여 감소시키는 방법을 사용하고 평면수리실험과 비교하였다. 그리고 전인식 등(2002)은 투과파를 허용하는 부유식 방파제에 반사와 투과 경계조건을 적용하여 항내의 파고분포를 해석하였으며, 김도삼 등(2002)은 말뚝 계류된 부유식 방파제에 대한 파랑해석 및 동적거동에 대하여 연구하였다.

투과방파제의 형식 중에서 사석이나 소파블록 투과제 또는 유공슬릿케이스 투과제 등과 같이 체체가 투과성 구조물로 되어 있는 방파제의 파랑 해석에 있어서는 구조물 전·후면의 위상차를 파악하기 위한 구조물 내부의 투과파 속도와 구조물의 마찰저항에 의한 에너지소산 효과를 반영하는 저항계수 등을 적절히 산정하는 것이 계산의 정도를 높이는 중요한 요소이다. 기존에 제안되어 있는 투과파 속도와 저항계수는 이론적으로 유도되어 매우 복잡한 식으로 구성되어 있고(Sollitt and Cross, 1972), 계수 자체가 많은 변수를 포함하여 수치모델에 사용하기가 불편하며, 연직2차원 모델에 한정되어 있다. 현재 국내에는 부유식 방파제에 대한 투과파랑장 해석모델은 제안되어 있지만 사석이나 소파블록 투과제, 유공슬릿케이스 투과제 등과 같이 구조물 자체가 투과성으로 이루어진 방파제의 평면파랑장을 해석할 수 있는 모델은 제안되어 있지 않다.

본 논문은 사석이나 소파블록으로 이루어진 투과성 방파제를 항만의 외곽구조물로 설치할 경우, 이에 대한 평면파랑장 해석모델에 있어서 입사파의 구조물 내부 투과 속도와 구조물의 저항계수를 이론식과 실험식을 이용하여 간편하게 산정할 수 있는 방법을 소개하고, 시간의존 완경사방정식 모델에 이들 방법과 임의투과율 경계조건을 도입하여 투과 사석방파제로 이루어진 항만의 평면파랑장을 해석할 수 있는 모델을 제시하였다. 모델의 검증은 조파수로 내에서 투과제에 대한 단면 수리모형실험을 실시하여 구조물 전·후면의 수위변동을 측정하고 계산결과와 시계열로 비교하였으며, 현지 항만의 소파블록 투과제에 대한 3차원 수리모형실험 결과와 계산결과를 항내 구역과 고비로 비교하여 이루어졌다.

2. 투과파랑장 해석을 위한 수치모델

2.1 지배방정식

본 모델의 지배방정식은 유속을 해저로부터 수면까지 적분하고 선유량의 형태로 표시하여 완경사 방정식으로부터 연속방정식과 운동량방정식의 한 쌍으로 유도된 시간

$${}_{ir}Q_{20} = A_2 \cdot {}_{ir}Q_2^{-\tau_2} \quad (15)$$

$${}_{i}Q_{10} = K_{r2} / (1 - K_{r2}) \cdot {}_{ir}Q_{20}^{-B \sin \beta_2 / c} \quad (16)$$

여기서, 첨자 2는 좌측으로부터의 입사파에 의한 것을 나타낸다. 식 (11)을 첨자를 붙여서 다시 쓰면,

$${}_{ir}Q_{10} = A_1 \cdot {}_{ir}Q_1^{-\tau_1} \quad (17)$$

이고, A_2, τ_2 는 식 (12), (13)에 있어서 1을 2로 바꾸어준 식으로 주어진다.

양측경계에서의 경계조건은 x 방향 유량을 Q_{10}, Q_{20} 으로 하여 다음 식으로 주어진다.

$$Q_{10} = {}_{ir}Q_{10} + {}_{i}Q_{10} \quad (18)$$

$$Q_{20} = {}_{ir}Q_{20} + {}_{i}Q_{20} \quad (19)$$

식 (14), (16)으로부터 ${}_{i}Q_{10}, {}_{i}Q_{20}$ 은 각각 ${}_{ir}Q_{10}, {}_{ir}Q_{20}$ 으로 주어지고 식 (15), (17)로부터 ${}_{ir}Q_{10}, {}_{ir}Q_{20}$ 은 ${}_{ir}Q_1, {}_{ir}Q_2$ 로 주어진다. 이들은 각 격자점에서의 유량 중 입사파 및 반사파에 의한 것이고, 각 격자점에서의 유량

$$Q_1 = {}_{ir}Q_1 + Q_1 \quad (20)$$

$$Q_2 = {}_{ir}Q_2 + Q_2 \quad (21)$$

로부터, 투과파에 의한 유량 ${}_{i}Q_1, {}_{i}Q_2$ 를 빼줄 필요가 있다. 이들은 각각 투과파가 1격자간격 Δs 를 통과하는데 필요한 위상차만큼 지체된 ${}_{i}Q_{10}, {}_{i}Q_{20}$ 으로 생각하여 다음식으로 주어진다.

$${}_{i}Q_1 = {}_{i}Q_{10}^{-\Delta s \sin \beta_2 / c} \quad (22)$$

$${}_{i}Q_2 = {}_{i}Q_{20}^{-\Delta s \sin \beta_1 / c} \quad (23)$$

이렇게 하여 투과파가 있는 경우에 대한 경계조건이 주어지며, ${}_{i}Q_1, {}_{i}Q_2$ 의 값은 실제 수치계산에 있어서는 계산시간 증분에 따라 ${}_{i}Q_{10}, {}_{i}Q_{20}$ 으로부터 τ 시간 이전의 값을 2차 보간법으로 구한다. y 방향의 유량에 대해서도 동일한 방법으로 구한다.

2.3 투과구조물 내부의 파속

파랑이 투과 사석방파제에 입사할 때, 구조물 내부의 수립자 속도는 장파에 대한 이론식(Madsen and White, 1976; Seeling, 1980)으로 부터 다음과 같이 주어진다.

$$u_s = a_i \sqrt{\frac{g}{h} \left(\frac{1}{1 + \lambda} \right)} \quad (24)$$

여기서, u_s 는 구조물 내부의 수립자 속도, a_i 는 입사파의 진폭이고, λ 는 다음식으로 주어지는 계수이다.

$$\lambda = \frac{k_0 l_d f}{2n_r} \quad (25)$$

여기서, k_0 는 파수($=\sigma/\sqrt{gh}$), l_d 는 방파제의 폭, n_r 은 공극율, f 는 무차원 저항계수로서 아래의 식으로 주어진다.

$$f = \frac{n_r}{k_0 l_d} \left\{ \left[1 + \left(1 + \frac{170}{R_d} \right) \frac{16\beta_r l_e}{3\pi a_i h} \right]^{1/2} - 1 \right\} \quad (26)$$

여기서, R_d 는 입자의 레이놀즈수(Reynolds number)로서

$$R_d = \frac{u_s d_r}{\nu} \quad (27)$$

이고, d_r 은 사석의 평균직경, ν 는 동점성계수이다. 그리고, β_r 은 사석의 동력학적 특성을 나타내는 계수로서 다음의 식으로 주어진다.

$$\beta_r = 2.7 \left(\frac{1 - n_r}{n_r^3} \right) \frac{1}{d_r} \quad (28)$$

구조물 내부의 수립자 속도 u_s 를 구하기 위해서는 λ 의 초기치를 가정해야만 하고, u_s, R_d, f 를 결정한 후, 다시 새로운 λ 를 구해가는 반복계산이 필요하다. 본 연구에서는 이와 같이 복잡한 계산과정을 피하기 위하여 무차원 저항계수 f 를 실험식 (35)로 산정하고 이를 식 (25)에 대입하여 λ 를 구한 다음, 식 (24)를 사용하여 수립자 속도 u_s 를 구하는 방법을 시도하였다.

한편, 수치모델에서 필요한 값은 구조물 내부의 파속이므로 수립자 속도를 파속과 연관지어야만 한다. 우리가 이미 잘 알고 있듯이, 천해 영역에서의 파속은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u = \sqrt{gh} \frac{\eta}{h} = C \frac{\eta}{h} \quad (29)$$

$$C = u \frac{h}{\eta} \quad (30)$$

여기서, u 는 입사파의 수립자 속도, g 는 중력가속도, η 는 수면변위, h 는 수심, C 는 파속이다.

식 (30)의 파속 C 가 장파의 파속이므로 수립자 속도 u 는 장파영역에서 유도된 구조물 내부의 수립자 속도 u_s 로 바꾸어 쓸 수 있다. 따라서, 구조물 내부의 파속 C_s 는 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$C_s = u_s \frac{h}{\eta} \quad (31)$$

2.4 저항계수

저항계수 f 는 투과성 구조물 주변에 대한 파랑장 해석에 있어서 파 에너지의 감쇠를 평가하기 위한 중요한 요소이다. 기존에 잠재 구조물을 대상으로 완경사방정식에 의한 파랑변형 해석에 저항계수를 도입하고 있지만 (Rojanakamthorn 등, 1989; 泉宮 등, 1989), 충분히 검토된 것은 아니다. 또한 Delmonte(1972)가 둥근 구형물체를 쌓아서 만든 제체에 대한 수리모형실험 결과로부터 저항계수와 레이놀즈수의 중요성을 지적하였지만, 현지의 높은 레이놀즈수 영역에 대한 수치모델에의 적용이 가능할 지는 의문의 여지가 있다.

한편, Sawaragi *et al.*(1992)은 잠재를 포함한 대부분의 투과성 구조물에 대한 파랑변형 해석에 있어서 중요한 역할을 담당하는 저항계수의 실태를 파악하기 위하여 저항계수와 파고·공극대표경 비율과의 관계를 검토하고, 아울러 저항계수와 레이놀즈수의 관계를 수리모형실험을 통하여 명확히 하였다. Sollitt and Cross(1972)는 Lorentz의 원리를 이용하여 장파영역에 있어서 투과율 K_T 를 다음 식과 같이 표시하였다.

$$K_T = \frac{1}{\left[\left\{ 1 + \frac{\sigma B f}{2\varepsilon \sqrt{gh}} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sigma B (s + \varepsilon^2)}{2\varepsilon \sqrt{gh}} \right\}^2 \right]^{0.5}} \quad (32)$$

여기서, h 는 수심, σ 는 각주파수, B 는 제체 폭, ε 은 공극률, s 는 관성계수이다.

식 (32)는 저항계수 f 에 대하여 정리하면 다음 식과 같이 장파영역에 대한 저항계수식을 얻을 수 있다.

$$f = \frac{\varepsilon \sqrt{gh}}{\sigma B} \left\{ -2 \pm 2 \sqrt{\frac{1}{K_T^2} - \frac{\sigma^2 B^2 (s^2 + 2s\varepsilon^2 + \varepsilon^4)}{4\varepsilon^2 gh}} \right\} \quad (33)$$

식 (33)의 관성계수 s 는 近藤(1981)에 의하면 사석이나 블록의 층 쌓기와 같이 공극의 크기가 구성재료 개체의 크기와 비슷한 정도의 경우는 다음식과 같다.

$$1 \leq s \leq 1 + \varepsilon \quad (34)$$

이형블럭의 난적구조에서는 $\varepsilon=0.5$ 이므로, 관성계수는 $s=1.0 \sim 1.5$ 가 된다.

식 (33)은 파장, 제체 폭, 공극률은 변수로서 포함되어 있지만, 현지와 대의 대응을 생각하면 파고나 레이놀즈수의

반영이 필요하다. 따라서 Sawaragi *et al.*(1992)은 저항계수와 파고 및 레이놀즈수의 관계를 정의하기 위하여 수리모형실험을 실시하였다. 실험조건으로는 상대수심(h/L)은 0.08, 파형경사(H_f/L)는 0.011~0.030의 범위에서 12종류를 선택하였다. 그리고 수심은 30~45 cm, 주기는 2.0~2.6 sec, 제체 폭은 10~200 cm의 범위에서 4종류이며, 이형블럭은 공칭높이(d)가 4.5~18.9 cm까지의 4종류를 선택하였다. 실험결과 저항계수를 입사파고와 레이놀즈수의 관계식으로 표시할 수 있었으며, 그 식은 다음과 같다.

$$f = \frac{200(H_f/d')}{Re^{0.5}} \quad (35)$$

여기서, H_f 는 투과제 전면의 입사파고이고, d' 는 블록의 공칭직경이며, Re 는 다음식으로 주어지는 레이놀즈수이다.

$$Re = \frac{u \cdot d'}{v} \quad (36)$$

여기서, u 는 입사파의 수평 수립자 속도, v 는 해수의 동점성계수이다.

Sawaragi *et al.*(1992)은 식 (35)의 타당성을 검증하기 위하여 이 식으로 산출한 f 를 식 (32)에 대입하여 투과율 K_{TCAL} 을 구하고, 실험치 K_T 와 비교한 결과 K_T 와 K_{TCAL} 은 대체로 잘 일치함을 보여주고 있다. 본 모델에서는 투과제 블록의 공칭직경과 입사파고 및 수평 수립자 속도를 정의하고, 식 (35)를 사용하여 저항계수 f 를 편리하게 결정하도록 구성하였다.

3. 수치모델의 검증

3.1 투과이안제 배후의 파고분포 계산

검증대상으로 한 모델케이스는 일본토목학회 해안공학 위원회에서 제시한 것으로서 가로 600m, 세로 400m인 영역의 중앙에 반사율(K_R) 0.4, 투과율(K_T) 0.3의 투과이안제가 설치된 경우이며(Fig. 2), 계산조건은 Table 1과 같이, 입사파고 1.0m, 주기 5.0 sec, 격자간격 0.5m, 계산 시간간격 0.1 sec이다.

Fig. 3은 일본토목학회(1993)에 제시되어 있는 계산결과로서 이안제 전면의 입.반사파 공존장에서는 반사파로 인한 부분적인 중복파가 형성되어 1.0~1.5m의 파고가 나타남을 알 수 있으며, 이안제 배후에서는 투과파로 인하여 0.2~0.4m의 파고분포를 나타내고 있다.

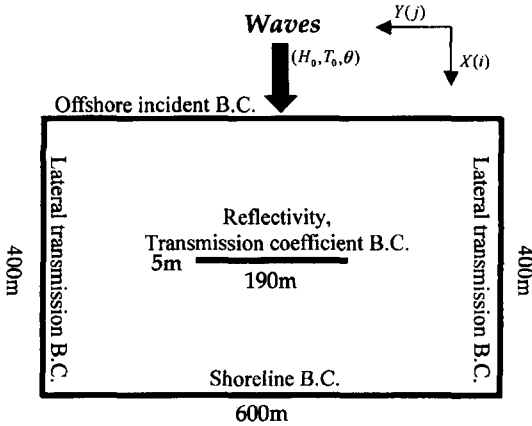


Fig. 2. Sketch of computation region for permeable detached breakwater.

Table 1. Computation condition of permeable detached breakwater

Water depth (h)	10.0m
Wave height (H_0)	1.0m
Wave period (T_0)	5.0 sec
Wave angle (θ)	0.0 deg
Grid increment ($\Delta x = \Delta y$)	5.0m
Time step (Δt)	0.1 sec
Reflection coefficient (K_R)	0.4
Transmission coefficient (K_T)	0.3
Resistance factor (f)	2.95

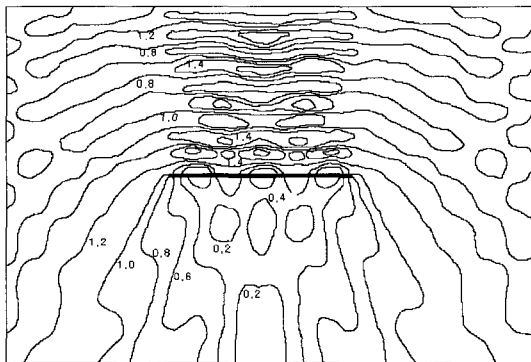


Fig. 3. Distribution of wave height (JSCE).

Fig. 4는 본 연구에서 수립된 수치모델의 계산결과로서 이안제 전면에서는 1.0~1.5m의 파고분포를 나타내었고, 이안제 배후에서는 0.2~0.4m의 분포를 보이고 있다. 등파고선도의 형태는 일본토목학회의 결과와 본 모델에 의한 결과가 유사함을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 본 모델의 투과경계조건에 대한 검

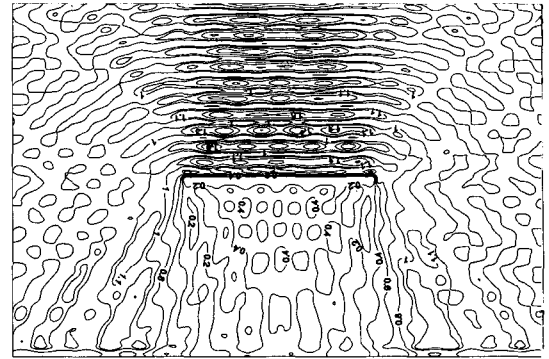


Fig. 4. Distribution of wave height (present model).

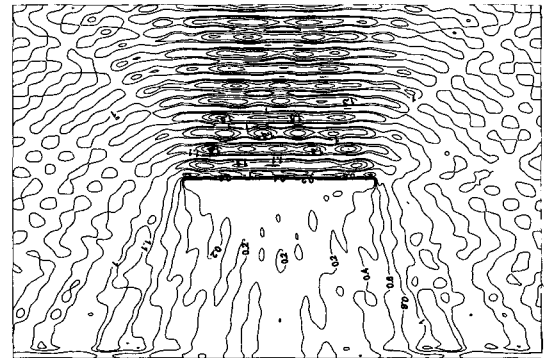


Fig. 5. Distribution of wave height ($K_T=0.0$).

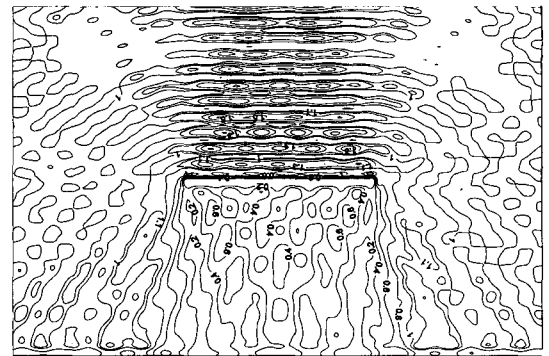


Fig. 6. Distribution of wave height ($K_T=0.4$).

토의 일환으로써 반사율은 0.4로 고정하고, 투과율을 각각 0.0과 0.4로 변화시켜서 계산한 결과이다. 이안제 전면의 중복파랑장 영역은 두 경우 모두 투과율 0.3인 경우 (Fig. 4)와 유사한 파고분포를 보이고 있다. 이안제 후면의 투과파랑장 영역은 투과율에 따라 파고분포가 전혀 다른 양상을 나타내고 있다. 즉, 투과율이 0.0인 경우는 불투과 조건이 계산에 잘 반영되어 구조물 배후에 차폐영

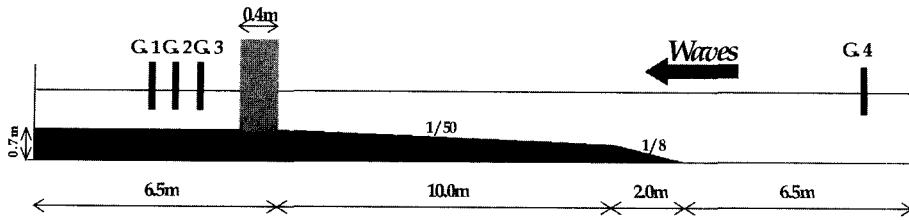


Fig. 7. Wave flume of physical model test.

역이 형성되고 있으며, 이안제 양단에서 회절된 파랑의 모습이 잘 나타나고 있다(Fig. 5). 그리고 투과율이 0.4인 경우는 투과파랑의 증가로 인하여 이안제 후면에서 0.4~0.6m의 파고분포를 보이고 있으며, 이는 투과율이 0.3인 경우에 비하여 파고가 0.1~0.2m 정도 증가한 것이다(Fig. 6). 이들 계산결과로부터 본 모델의 임의투과율 경계조건은 투과율에 따라 투과파랑장을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

3.2 단면 2차원 검증실험

본 연구에서는 수치모델의 검증을 위하여 단면 2차원 수리모형실험을 실시하였다. 실험수로의 단면은 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 수로의 전체 길이는 2500 cm, 폭은 70 cm, 높이는 150 cm이고, 조파기의 위치는 심해측으로부터 1.0m 이다. 해저지형은 심해측으로부터 수평, 1/8경사, 1/50경사, 수평상으로 재현하였고, 조파수심과 구조물 설치지점의 수심치는 70 cm이다. 실험에 사용한 투과구조물은 길이 70 cm, 폭 40 cm, 높이 80 cm의 소파블록 투과제이고, 심해측으로부터 18.5m 떨어진 수평상에 설치하였다. 파고계는 조파관 전면의 1m 지점에 1기(G4)와 구조물 후면에 0.7m 간격으로 3기(G1, G2, G3)를 설치하였다. 실험에 사용된 파는 규칙파이며, 비월파, 비쇄파 조건을 만족한다.

Table 2. Condition of physical model test and numerical model test (Case 1)

Water depth (h)	60.0 cm
Wave height (H_0)	4.0 cm
Wave period (T_0)	1.0 sec
Wave angle (θ)	0.0 deg
Grid increment ($\Delta x = \Delta y$)	5.0 cm
Time step (Δt)	0.01 sec
Reflection coefficient (K_R)	0.42
Transmission coefficient (K_T)	0.25
Resistance factor (f)	1.03

Table 3. Condition of physical model test and numerical model test (Case 2)

Water depth (h)	40.0 cm
Wave height (H_0)	8.0 cm
Wave period (T_0)	2.0 sec
Wave angle (θ)	0.0 deg
Grid increment ($\Delta x = \Delta y$)	5.0 cm
Time step (Δt)	0.01 sec
Reflection coefficient (K_R)	0.47
Transmission coefficient (K_T)	0.60
Resistance factor (f)	0.60

검증실험과 계산의 조건은 Table 2와 Table 3에 나타난 바와 같다. Case 1은 구조물 전면의 수심이 60 cm, 입사파의 파고가 4.0 cm, 주기 1.0 sec이고, 조파 위치에 서의 파장은 1.56m이다. 그리고 계산조건은 격자간격 5.0 cm, 시간간격 0.01 sec이고, 구조물의 반사율은 실험에 의하여 구해진 값으로 0.42, 투과율은 0.25이다. Case 2는 구조물 전면의 수심이 40 cm, 입사파의 파고가 8.0 cm, 주기 2.0 sec이고, 조파 위치에서의 파장은 5.36m이다. 계산격자간격과 시간간격은 Case 1과 같고, 구조물의 반사율은 0.47, 투과율은 0.60이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 수치모델상에서 파가 정상상태에 도달했을 때의 수위값을 이용하여 공간파형을 그래픽화 한 것이다. Case 1은 조파위치로부터 12파장정도 전파한 후 구조물에 입사되고 있으며, 구조물을 통과한 파랑은 수위가 낮아져 있음을 알 수 있다(Fig. 8). Case 2는 조파 위치로부터 5파장정도 전파한 후 구조물에 입사되고 있는



Fig. 8. Wave profile by numerical model (Case 1).



Fig. 9. Wave profile by numerical model (Case 2).

며, 구조물 후면에 투과파가 형성됨을 잘 보여주고 있다 (Fig. 9).

수치모델의 검증은 수리모형실험에서 측정한 수위값과 같은 위치에서 수치모델에 의해서 얻어진 수위값을 시계열로 비교하는 방법을 사용하였다. Case 1의 결과인 Fig. 10을 살펴보면, 조파판 전면에 위치한 계측점 G4의 결과는 수리모형 결과에서 매끄럽지 못한 수위값이 보이지만 두 결과 모두 입사파고 4.0 cm를 잘 재현하고 있다. 그리고 구조물 후면의 계측점 G1, G2, G3의 결과는 투과파 성분만 존재하므로 파고가 약 2.0 cm 정도로 낮아짐을 알 수 있다. Case 2의 결과인 Fig. 11은 계측점 G4에서는 두 결과에 약간의 위상차를 보이지만 역시 입사파고 8.0 cm를 잘 재현하고 있으며, 구조물 후면의 계측점 G1, G2, G3에서는 약 4.5 cm의 파고를 나타내고 있다. 수위 검증결과에서 알 수 있듯이 수리모형실험 결과와 수치모델에 의한 결과는 매우 좋은 일치치를 보여주고 있다.

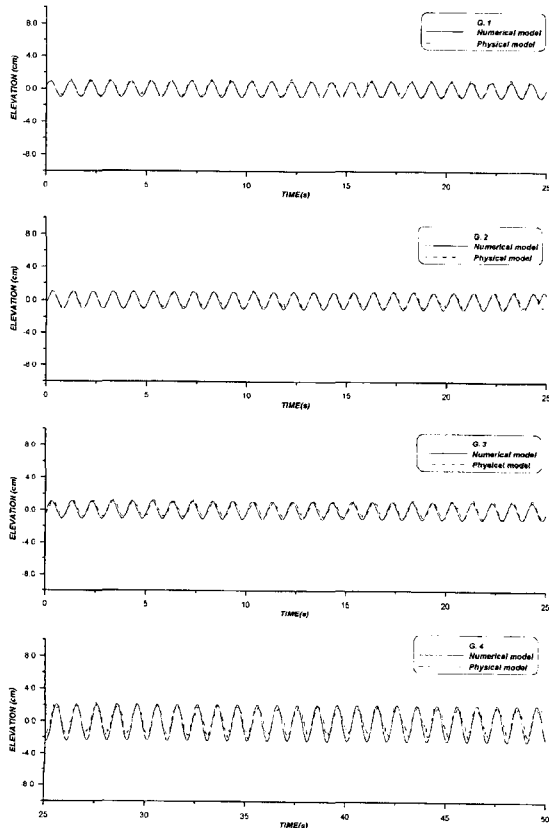


Fig. 10. Comparison of water surface elevation (Case 1).

3.3 현지 적용성 검토

본 연구에서는 수치모델의 현지 적용성을 검토하기 위하여 제주외항에 소파블록 투과제를 설치하였을 경우에 대한 평면수리모형실험의 결과와 본 모델에 의한 계산결과를 구역별 파고비로 비교하였다. 수리모형실험의 결과는 건설기술연구원(2001)에서 실시한 실험결과를 사용하였다.

계산에 사용된 심해파의 제원은 파고 7.0m, 주기 11.0 sec, 주파향은 NNW방향이고, 격자형성은 주파향인 NNW 방향에 대하여 직각으로 하였으며, 격자간격은 10.0m, 계산시간간격은 CFL조건을 만족하는 0.2 sec로 하였다. 계산에 사용된 구조물의 평면배치는 항의 개발이 완성된 상태이다. 수치계산에서는 구조물의 반사특성을 계산에 적절히 반영하기 위하여 직립벽의 경우 0.9, 소파블록은 0.4, 자연해안은 0.1의 반사율을 적용하였다. 소파블록 투과제의 경우 반사율과 투과율을 각각 0.4로 하였다. Fig. 12는 평면수조에 설치된 파고계와 유속계의 위치를 나타내고 있으며, 서방파제 두부 약 100m 구간에 단면경사 1:4/3의 소파블록 투과제를 설치하였다.

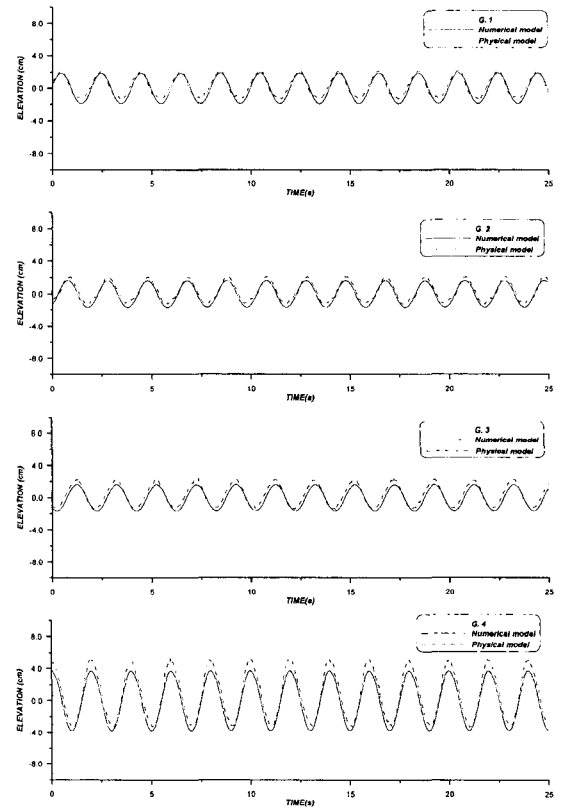


Fig. 11. Comparison of water surface elevation (Case 2).

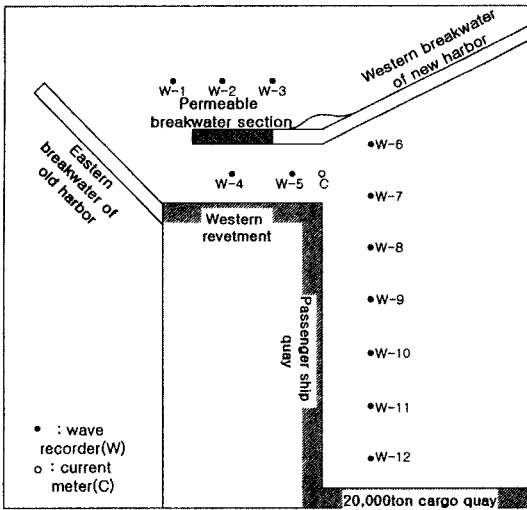


Fig. 12. Measured points of physical model test.

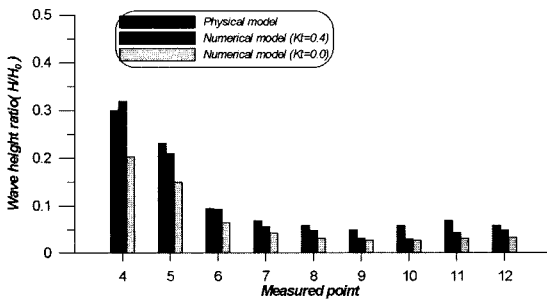


Fig. 13. Comparison of wave height ratio.

수치계산은 동일한 조건에서 불투과($K_f=0.0$)인 경우와 투과율 $K_f=0.4$ 인 경우에 대하여 실시하였다. Fig. 13은 계측점별 파고비 값으로서 수리모형실험의 결과와 본 모델에 의한 결과를 막대그래프로 도시한 것이다. 투과제 배후에 위치한 계측점 4와 5의 수리모형실험 결과는 투과파의 영향으로 파고비 0.3, 0.24의 높은 파고비를 나타내고 있으며, 본 모델에 의한 투과율 $K_f=0.4$ 의 결과는 수리모형실험의 결과에 근접하지만 불투과일 때는 과소평가됨을 알 수 있다. 투과파의 차폐영역에 속하는 계측점 9~12의 결과는 투과, 불투과 계산 모두 수리모형실험 결과보다 과소평가 되고 있으며, 이것은 시간의존 환경사방정식 모형의 이중회절 평가가 엄밀하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 항내측의 일부 수역을 제외하면 본 모델에 의한 결과는 수리모형실험의 결과를 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 14는 불투과제 설치시의 등파고선도로서 항내측은 0.3m 이하의 정온수역을 보이고

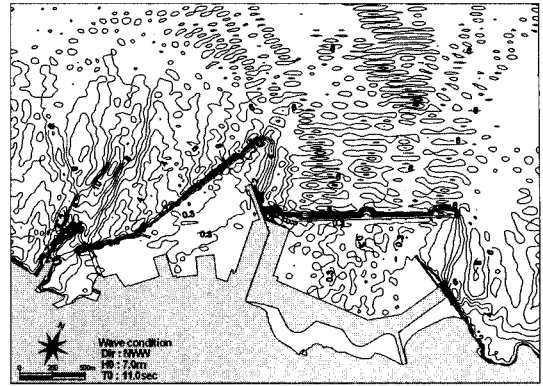


Fig. 14. Distribution of wave height (impermeable).

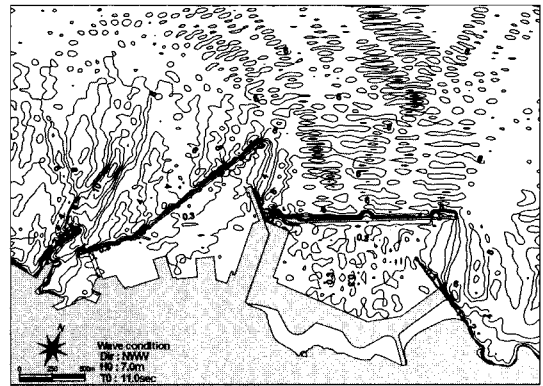


Fig. 15. Distribution of wave height (permeable).

있으며, 특히 방파제 배후의 유람선 부두 전면에는 0.3m 등파고선이 나타나지 않는다. 투과제를 설치한 경우인 Fig. 15는 투과제 배후의 유람선 부두 전면에서 불투과제의 결과에서는 나타나지 않던 0.3m 등파고선을 확인할 수 있다

4. 결 론

투과성 구조물 주변의 평면파랑장을 해석하기 위한 수치모델은 구조물 내부의 투과파 속도와 저항계수를 적절히 산정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 장파에 대한 투과파 속도와 저항계수를 이론식과 실험식을 이용하여 수치모델에 사용하기 편리하도록 정의하고, 시간의존 환경사방정식과 임의투과율 경계조건을 사용하여 투과성 구조물 주변의 평면파랑장을 해석할 수 있는 수치모델을 소개하였다. 본 모델의 검증은 위하여 실시한 투과이안제 주변의 파고분포 계산에서는 임의투과율 경계조건

의 타당성이 잘 나타났으며, 소파블록 투과구조물에 대한 단면 2차원 검증실험에서는 구조물 전·후면의 수위변동을 측정하고 수치계산 결과와 시계열로 비교한 결과 모델의 재현성이 매우 좋음을 확인할 수 있었다. 또한, 본 모델은 실제 항만의 투과방파제에 대한 평면수리모형의 실험 결과를 잘 재현함으로써 현지 적용성이 좋음을 알 수 있었다. 본 연구에서 제시된 모델은 투과성 구조물의 평면 배치 계획을 수립할 때 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각한다. 단, 투과구조물의 반사율과 투과율을 적절히 선정하는 것이 중요하며, 평면수리모형실험을 통하여 경사 입사파에 대한 투과율이 산정된다면 방향성을 고려한 모델의 확장이 가능할 것이다.

참고문헌

- 건설기술연구원, 2001. 제주외항 대안 입찰 수리모형실험 보고서.
- 김도삼, 윤희면, 2002. 말뚝계류된 부방파제의 공간파랑제이 및 동적거동에 관한 연구, 한국해양·해양공학회지, **14**(3): 183-191.
- 박우선, 전인식, 이달수, 1993. 유공방파제의 반사특성에 관한 수리실험, 한국해양·해양공학회지, **5**(3): 198-203.
- 박현주, 전인식, 이달수, 2002. 경사식 방파제의 수리특성 결정을 위한 수치해석, 한국해양·해양공학회지, **14**(1): 19-33.
- 전인식, 최민호, 심재철, 오병철, 2002. 부유식 방파제의 반사·투과경계조건을 적용한 항만 정온도 해석, 한국해양·해양공학회지, **14**(1): 76-85.
- 정신탐, 박우선, 이호찬, 2002. 다열 부유식 방파제의 유한요소 해석, 한국해양·해양공학회지, **14**(4): 257-264.
- Delmonte, R.C., 1972. Scale effects of wave transmission through permeable structures, *Proc., 13th Int. Conf. Coast. Engrg.*, pp. 1867-1872.
- Liu, P.L.-F., Lin, P., Chang, K.-A., and Sakakiyama, T., 1999. Numerical Modeling of wave interaction with porous structures, *J. Wtrwy., Port. Coast. and Oc. Engrg.*, ASCE, **125** (6), pp. 322-330.
- Lynett, P.J., Liu, P.L.-F., Losada, I.J., and Vidal, C., 2000. Solitary wave interaction with porous breakwater. *J. Wtrwy., Port. Coast. and Oc. Engrg.*, ASCE, **126**(6), pp. 314-322.
- Madsen, O.S., 1974. Wave transmission through porous structures, *J. Wtrwy., Harb. and Coast. Engrg. Div.*, ASCE, **100** (3), pp. 169-188.
- Madsen, O.S. and White, S.M., 1975. *Reflection and transmission characteristics of porous rubble mound breakwater*, Rep. No. 207, R.M. Parsons Lab., MIT, Cambridge, Mass.
- McIver, P., 1999. Water wave diffraction by thin porous breakwaters, *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc Engrg.*, ASCE, **125**(2), pp. 66-70.
- Sawaragi, T., Ida, K., Nochino, M., and Kan, T., 1992. For limitations of hydraulic model test on wave transformation by porous structures, *Proc. 39th Japanese Conf. on Coastal Engrg.*, JSCE, pp. 616-620 (in Japanese).
- Seeling, W.N., 1980. *Two-dimensional tests of wave transmission and reflection characteristics of laboratory breakwaters*, CERC TR80-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Sollitt, C.K. and Cross, R.H., 1972. *Wave refraction and transmission at permeable breakwaters*. Ralph M. Parsons Laboratory, MIT, Report No. 147, pp. 250.
- Sulisz, W., 1985. Wave reflection and transmission at permeable breakwaters of arbitrary cross-section, *Coastal Engineering*, **9**, pp. 371-386.
- Van Gent, M.R.A., 1995. *Wave interaction with permeable coastal structures*, PhD thesis. Delf University, Delft University, Delf, The Netherlands.
- Yu, X., 1995. Diffraction of water waves by porous breakwaters, *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc Engrg.*, ASCE, **121** (6), pp. 275-282.
- Yu, X. and Togashi, H., 1996. Combined diffraction and transmission of water waves around a porous breakwater gap, *Proc., 25th Int. Conf. Coast. Engrg.*, ACES, New York, pp. 2063-2076.
- 井島武士, 周宗仁, 湯村やす, 田淵幹修, 1973. 任意形狀の透過および不透水過防波堤による波の散亂と波力, 海岸工學講演會論文集, **20**: 79-87.
- 酒井哲郎, 佐藤孝夫, 岩垣雄一, 1978. 任意反射率·任意透過率の防波堤による平面的な波浪變形の數値計算, 海岸工學講演會論文集, **20**: 98-102.
- 近藤淑郎, 1981. 直立消波構造物の水理特性, 水工學に關する夏期研修會講義集, 81-B-1, 16p.
- 西村仁嗣, 丸山康樹, 平口博丸, 1983. 直接數値積分法による波の場の解析, 海岸工學講演會論文集, **30**: 123-127.
- 泉官尊司, 遠藤雅人, 1989. 潜堤および透過性構造物のある海濱における波動場解析, 海岸工學講演會論文集, **36**: 638-642.
- Somchai Rojanakamthorn, 磯部雅彦, 度邊晃, 1989. 透過潜堤による波浪變形の解析モデル, 海岸工學講演會論文集, **36**: 643-647.
- 日本土木學會 海岸工學委員會, 1993. 波構造物·地盤の調査·設計手法 調査·研究報告書, 58p.
- 鈴木康正, 森川高德, 辻安治, 永末英之, 平石哲也, 1994. 環

境保全型防波堤周邊の波浪變形計算, 海岸工學論文集, **41**: 991-995.

磯部雅彦, 高橋重雄, 余錫平, 秋山勉, 藤間功司, 川崎浩司, 蔣勤, 秋山實, 大山洋志, 1999. 數値波動水路の耐波設計への適用に関する研究--VOF法基本プログラムの作成--, 日本土木學會, 海洋開發論文集 **15**: 321-326.

海岸開發技術研究センター, 2001. 數値波動水路の研究・開發報告書.

Received April 8, 2003

Accepted May 23, 2003