

해빈내의 흐름장 해석을 위한 침투류 모형 Seepage Flow Model for Analysis of the Flow Field within the Beach

김규한* · 박창근* · 한상대** · 편종근***

Kyu Han Kim*, Chang Kun Park*, Sang Dae Han** and Chong Kun Pyun***

要 旨 : 해빈보존공법중 배수층설치 공법의 타당성 분석을 위하여 파랑모형과 침투류모형을 결합한 복합모형을 구성하여 수치실험을 수행하였다. 파랑모형으로는 Shuto(1972)의 해석해를 사용하였고, 침투류모형으로는 포화-비포화흐름의 지배방정식인 Richards식을 사용하였다. 구성된 복합모형의 민감도 분석에 의하면 포화투수계수가 해빈내부의 지하수 흐름장에 가장 민감한 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 또한 보다 많은 현지의 실측자료들이 수집된다면 개발된 모형은 해빈내에 배수층 설치시 필요로 되는 제요소 해석에 효율적으로 이용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 배수층, 해빈보존공법, 침투류, 복합모형

Abstract □ In order to analyze the feasibility of the drain layer construction method, which is one of the beach protection methods, a hybrid model is constructed by combining the wave model and the seepage flow model. The used wave model is the analytic solution given by Shuto (1972), and the seepage flow model is used by Richards equation which governs the saturated-unsaturated flow in the porous media. It is concluded by the sensitivity analysis of the hybrid model that the most sensitive parameter in the flow field within the beach is the saturated hydraulic conductivity. The developed hybrid model will be efficiently used in the analysis of the parameter when the drain layers are constructed in the beach, if the field datas are obtained more.

Keywords : drain layer, beach protection, seepage flow, hybrid model

1. 서 론

해안보전공법에 사용되어온 각종의 방법 중 펌프가동에 의한 강제 지하수위저하에 따른 해빈침식 제어법은 친수성을 지닌은 물론 효율면에 있어서도 매우 이상적인 방법이라 할 수 있다. 그러나 경제성 등을 고려할 경우 강제적인 지하수위저하에 소요되는 비용이 너무 큰 것으로 나타났다(Davis *et al*, 1992). 따라서 배수층을 해안전면의 해빈내부에 설치하여 자연배수시켜 해빈내의 지하수위를 낮추고자 하는 방법을 고안하였다. 이 방법은 기존의 지하수위저하에 따른 해빈침식 제어법에 경제성까지 아울러 고려할 수 있도록 하는

새로운 방법이라 할 수 있다. 본 연구에 있어서는 이와 같은 배수층 설치에 의한 해빈침식 방지방법에 대해 검토하기로 한다. 이 방법에 대한 실효성 검토에 있어서는 이동상 수리모형 실험 및 수치모형실험, 현지 해안에 대한 현지실험 등을 들 수 있으나 본 연구에서는 상기 세가지 방법 중 수치모형실험을 수행하여 배수층 설치에 따른 지하수위 저하문제에 대해 살펴보고자 한다.

배수층의 설치효과를 해석하기 위한 모형은 두가지 모형으로 대별될 수 있는데, 그것은 해빈지반의 지하수 유동을 살펴보기 위한 침투류 수치모형과 해빈전면에 작용하는 외력조건인 파랑모형이다. 따라서 침투류에 의한 지하수위 저하효과 등을 검토하기 위해서는

*관동대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Kwandong University, Kangwondo, 215-800, Korea)

**한진건설(주) 인천국제공항현장 (Hanjin Engineering & Construction Co., LTD, Incheon, 400-340, Korea)

***명지대학교 토목공학과 (Department of Civil & Environmental Engineering, Myongji University, Kyunggido, 449-728, Korea)

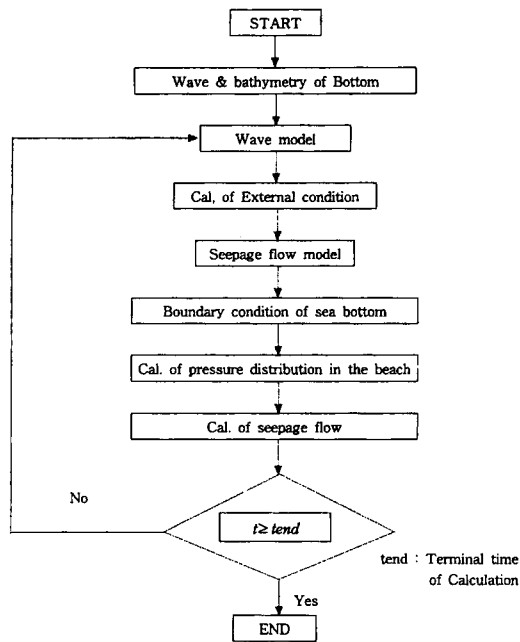


Fig. 1. Conceptual flow chart for hybrid model.

이 두 모형이 잘 결합된 복합모형(hybrid model)을 사용하여야 한다. 위에서 언급한 복합모형에 대한 계산 흐름도는 Fig. 1과 같다.

외력으로 작용하는 파랑해석은 수치모형을 사용하는 것이 보다 타당성 있는 방법일 것이지만, 여기서는 Shuto(1972)에 의해 수립된 이론해를 이용하기로 한다. Shuto의 이론해는 비교적 긴 주기를 갖는 장주기 파를 대상으로 한 해석해이며, 파의 선단 즉 해변사면과 만나는 부분에서의 쳐오름(up-rush), 쳐내림(down-rush)을 비교적 잘 표현할 수 있는 장점을 지니고 있다. 실제로 파랑에 대한 수치모형을 사용한다고 하더라도 파의 선단에 대한 쳐오름, 쳐내림의 재현에 있어서는 선단의 이동경계 처리문제 등으로 인해 아직 실제의 자연현상을 잘 재현시켜 주는 모형을 찾기는 쉽지 않다. 따라서 전빈에서의 표사이동은 장주기파에 의한 영향이 보다 지배적이라는 점을 감안할 때 파랑모형은 파의 쳐오름, 쳐내림 등을 잘 표현해주고 또한 장주기 파의 상태를 해석적으로 구한 Shuto의 이론해를 사용하여도 무방할 것으로 판단된다.

그러므로 본 연구의 목적은 파랑조건은 이론해, 침투류는 수치모형으로 이루어진 복합모형을 사용하여 해변전면 내부의 지하수변동을 살펴보기 위한 수치해석 기법을 개발하고 그 적용성 여부를 검토하는데 있다.

이러한 수치모형실험은 현지실험 혹은 수리모형실험에 비해 파랑조건 및 저질조건 등을 자유롭게 변화시켜 적용할 수 있으므로 실제의 설치대상 해변의 제 조건에 즉시 대응할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 따라서 배수층 설치에 따른 해변안정화 방법, 즉 해변침식 방지방법의 설계에 있어서 수치모형에 의해 얻어진 계산결과는 유용하게 이용될 것으로 기대된다.

2. 복합모형의 구성

파랑과 침투류의 상호작용을 해석하는 것이 본 연구의 주요목적중의 하나이기 때문에, 수치모형의 구성상 복합모형을 이용하기로 한다. 즉, 침투류 해석모형은 Richards식을 기본방정식으로 한 수치해로 설명되고, 파랑해석모형은 Shuto(1972)의 이론해를 이용하여 설명될 수 있다. 따라서 본 연구에 사용된 이 두가지 모형을 살펴보면 다음과 같다.

2.1 침투류 해석모형

배수층 설치에 의한 해변에서의 흐름장을 해석하려면 비정상 상태에서 포화-비포화흐름을 설명할 수 있는 지배방정식의 설정이 필요한데, 그 지배방정식은 다음과 같은 Richards식으로 표시된다(赤井等, 1977).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) = (C(\psi) + S_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, 포화흐름의 경우 $C=0$ 가 되며, 비포화흐름의 경우 $S_s=0$ 가 된다. 여기서, $K(\psi)$ 는 비포화 투수계수(unsaturated hydraulic conductivity)이고, 다공성 매질은 균질하며, 이방성이라고 가정한다. 총수두 h 는 모세관 압력수두 ψ 와 위치수두 z 와의 합으로 표시된다($h=\psi+z$). $C(\psi)=\partial\theta/\partial\psi$ 는 함수보유능력(specific moisture content)이다. S_s 는 비저류계수(specific storage)로서 단위수두 강하에 의한 단위부피의 대수층으로부터 산출되는 물의 부피를 의미한다. 식(1)에서 $\psi(x, z, t)$ 가 구해지면 $h=\psi+z$ 인 관계로부터 $h(x, z, t)$ 를 구할 수 있다.

2.2 파의 쳐올림 · 쳐내림의 해석모형

앞서 설명한 바와 같이 해변 전면의 저부 침투류를 계산하기 위해서는 침투류를 유도시키기 위한 외력의

산정이 우선 요구된다. 해빈전면에 작용하는 외력으로서 파랑의 작용을 들 수 있으며 특히 파의 작용중에서도 해빈전면에서 발생하는 파의 쳐오름 현상을 잘 재현하여 줄 필요가 있다. 즉 파의 쳐오름과 쳐내림의 해석이 무엇보다 중요하다고 할 수 있겠다.

과거 호안형상과 해저지형조건을 고려한 파의 쳐오름 높이의 산정법으로서 Saville(1952)의 가상경사법과 中村(1972)의 수정가상경사법이 사용되어져 왔다. 그러나 이들 방법에 의해서는 소파구조물에 의한 파의 쳐오름 높이의 저감효과를 평가할 수 없기 때문에 여러 종류의 구조물이 설치된 조건에서 쳐오름 높이를 구할 경우, 실험에 의존하지 않을 수 없는 것이 현실이었다.

파가 $kd < \pi/10$ 인 천해역으로 진행할 때 종종 장파 또는 천해파라고 불린다. 아주 긴 주기와 파장을 갖는 조석파나 쓰나미는 심해에 존재할 지라도 천해파로 분류한다. 그와 관련하여 쓰나미의 변형계산에서는 천수 방정식이 종종 사용되어지고 있고 15% 이내의 오차로 쓰나미의 쳐오름 높이의 계산이 가능하다고 보고되고 있다(今村, 1986). 그러나 일반적으로 계산모형을 현지 해안에 적용하고자 할 경우 심해파조건으로서는 유의 파고와 유의주기가 부여되는 것이기 때문에 불규칙 파형 자체는 주어지지 않으므로 입력파형의 설정과 반사파의 처리가 필연적으로 문제가 될 것으로 판단된다.

파의 쳐오름과 쳐내림에 대한 해석해를 구하기 위하여, 비점성 유체의 2차원운동을 고려한다. 수립자의 위치는 $t=0$ 에서 (x_0, z_0) 이고 $t=t$ 에서 (x_1, z_1) 이다. 이 수립자에 작용하는 압력은 p 로 나타낸다. 정수면을 x 축으로 나타내고 z 축은 연직상향이 양의 방향(positive upward)이다.

경사호안에서의 정상파에 대한 1차 order의 해석해(shuto, 1972)는 다음과 같이 주어진다.

$$x_1 = \frac{A}{\sqrt{x_0}} J_1 \left(\frac{2\sigma}{\sqrt{g\alpha}} \sqrt{x_0} \right) \cos \sigma \quad (2)$$

$$z_1 = A \left[(z_0 + \alpha x_0) \frac{\sigma}{\sqrt{g\alpha}} \frac{1}{x_0} J_2 \left(\frac{2\sigma}{\sqrt{g\alpha}} \sqrt{x_0} \right) - \frac{\alpha}{\sqrt{x_0}} J_1 \left(\frac{2\sigma}{\sqrt{g\alpha}} \sqrt{x_0} \right) \right] \cos \sigma \quad (3)$$

$$p_1 = - \frac{\rho g \sigma}{\sqrt{x_0}} \frac{z_0}{x_0} A J_2 \left(\frac{2\sigma}{\sqrt{g\alpha}} \sqrt{x_0} \right) \cos \sigma \quad (4)$$

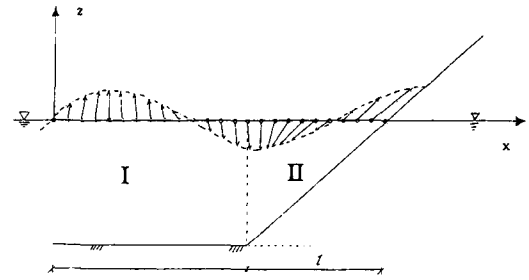


Fig. 2. Definition sketch of computational domain for up-rush and down-rush.

여기서 A는 Fig. 2와 같은 구간의 경계조건으로부터 식(5)와 같이 계산되고, 사용된 나머지 매개변수들은 다음과 같다.

$$A = \frac{2a}{kd} \sqrt{l} \left[J_0^2 \left(4\pi \frac{l}{L} \right) + J_1^2 \left(4\pi \frac{l}{L} \right) \right]^{-1/2} \quad (5)$$

x_0, z_0 : 시간 $t=0$ 에서의 수립자의 위치 (6a)

α : 사면(II구역)의 경사 (6b)

a : 입사파의 진폭 (6c)

k (파수) : $2\pi/L$ (6d)

σ (각진동수) : $2\pi/T$ (6e)

J_n : 제1종 n차 Bessel 함수 (6f)

3. 수치모형의 해석

3.1 다공성 매질의 수리특성

해빈에서 흐름장을 해석하기 위해서는 다음과 같은 세가지 다공성 매질의 수리특성(hydraulic property)을 알아야 한다. 즉, 함수량과 모세관 압력수두와의 관계를 설명하는 함수량함수 $\theta(\psi)$ 와 투수계수와 모세관 압력수두와의 관계를 설명하는 비포화 투수계수 $K(\psi)$ 및 대수층의 성질을 설명하는 비저류계수 S_s 를 확실히 해둘 필요가 있다.

일반적으로 표로 표시된 실측자료를 이용하여 식(1)을 해석하고자 할 때, 공기 임계 모세관 압력수두(ψ_0) 부근에서 함수보유능력 C 가 무한대로 계산되는 경향이 있으므로 수치해는 종종 불안정(unstable)해진다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 $\theta-\psi$ 의 관계로부터 $C(=\partial\theta/\partial\psi)$ 는 해석적으로 표시할 수 있으므로 수치해는 상대적으로 안정성을 확보할 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 함수량함수는谷(1985)가 제시한 다음

의 식을 이용하였다.

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi}{\psi_0} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\psi}{\psi_0} \right) + \theta_r \quad (7)$$

여기서 θ_s 와 θ_r 은 각각 포화함수량(saturated moisture content), 잔여함수량(residual moisture content)이고 ψ_0 는 임계모세관 압력수두이다. 함수보유능력 C 는 식(7)을 미분하면 다음과 같은 형태로 표시 된다.

$$C(\psi) = -(\theta_s - \theta_r) \frac{\psi}{\psi_0^2} \exp \left(- \frac{\psi}{\psi_0} \right) \quad (8)$$

비포화투수계수 K 는 Averjanov(1950)가 제시한 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$K(\theta) = K_s \cdot S_e^\gamma \quad (9)$$

여기서 K_s 는 포화투수계수(saturated hydraulic conductivity)이고 $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ 는 유효포화도(effective degree of saturation)이고, γ 는 흙의 특성을 설명하는 상수로써 일반적으로 실험결과에 의하면 $\gamma=3.5$ 로 추정되고, 그 값은 널리 사용되고 있다(日野, 1989). 모세관 압력수두 ψ 가 주어지면 식(7)에 의하여 함수량 θ 를 계산하여 식(9)에 의하여 $K(\theta)$, 또는 $K(\psi)$ 를 계산할 수 있다. 또한 비저류계수(S_e)에 대한 실측자료가 필요하다.

3.2 침투류 지배방정식의 차분화

비정상 상태에서 포화-비포화흐름이 결합된 지배방정식을 차분화하기 위하여 다음과 같이 변형하였다.

$$A \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(\psi)}{\partial z} \quad (10a)$$

$$= 0$$

$$A = C(\psi) + S_s \quad (10b)$$

수치해석을 수행하기 위하여 ADI(Alternating Direction Implicit) 방법을 사용하였으며, 식(10)에 대한 x방향-sweep은 다음과 같이 표시된다.

$$\bar{A}_{ij} \frac{\psi_{i,j}^{n+1/2} - \psi_{i,j}^n}{\Delta t/2} - \frac{1}{\Delta x} \left(\bar{K}_{i+1/2,j} \frac{\psi_{i+1,j}^{n+1/2} - \psi_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} - \bar{K}_{i-1/2,j} \frac{\psi_{i,j}^{n+1/2} - \psi_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x} \right)$$

$$- \frac{1}{\Delta z} \left(\bar{K}_{i,j+1/2} \frac{\psi_{i,j+1}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta z} - \bar{K}_{i,j-1/2} \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i,j-1}^n}{\Delta z} \right) - \frac{1}{\Delta z} \left(\bar{K}_{i,j+1/2} - \bar{K}_{i,j-1/2} \right) = 0 \quad (11)$$

여기서

$$\bar{A}_{ij} = C(\psi_{i,j}^n) + S_s \quad (12a)$$

$$\bar{K}_{i\pm 1/2,j} = \frac{1}{2} (K_{i,j} + K_{i\pm 1,j}) \quad (12b)$$

$$\bar{K}_{i,j\pm 1/2} = \frac{1}{2} (K_{i,j} + K_{i,j\pm 1}) \quad (12c)$$

ψ_{ij}^n 는 기지값으로 $n\Delta t$ 시간에서 계산된 모세관 압력수두이고 $\psi_{i,j}^{n+1/2}$ 은 $(n+1/2)\Delta t$ 시간 후에 계산되는 모세관 압력수두이다. 위 식을 정리하면 다음과 같이 음해법 형태로 표시된다.

$$-a_{ij}^{(i)} \psi_{i+1,j}^{n+1/2} + b_{ij}^{(i)} \psi_{i,j}^{n+1/2} - c_{ij}^{(i)} \psi_{i-1,j}^{n+1/2} = d_{ij}^{(i)} \quad (13)$$

여기서

$$a_{ij}^{(i)} = \frac{\Delta t}{2(\Delta x)^2} \bar{K}_{i+1/2,j} \quad (14a)$$

$$b_{ij}^{(i)} = \bar{A}_{ij} + a_{ij}^{(i)} + c_{ij}^{(i)} \quad (14b)$$

$$c_{ij}^{(i)} = \frac{\Delta t}{2(\Delta x)^2} \bar{K}_{i-1/2,j} \quad (14c)$$

$$d_{ij}^{(i)} = \bar{A}_{ij} - \frac{\Delta t}{2\Delta z} \left(\bar{K}_{i,j+1/2} \frac{\psi_{i,j+1}^n - \psi_{i,j}^n}{\Delta x} - \bar{K}_{i,j-1/2} \frac{\psi_{i,j}^n - \psi_{i,j-1}^n}{\Delta x} + \bar{K}_{i,j+1/2} - \bar{K}_{i,j-1/2} \right) \quad (14d)$$

이고 또한 각 계수에 포함되어 있는 상첨자 (i)는 x방향-sweep을 나타낸다.

식(10)에 대한 z방향-sweep은 다음과 같이 표시된다.

$$\bar{A}_{ij} \frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta t/2} - \frac{1}{\Delta x} \left(\bar{K}_{i+1/2,j} \frac{\psi_{i+1,j}^{n+1/2} - \psi_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} - \bar{K}_{i-1/2,j} \frac{\psi_{i,j}^{n+1/2} - \psi_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x} \right)$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{\Delta z} \left(\bar{K}_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{\psi_{i,j+1}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+1}}{\Delta z} - \bar{K}_{i,j-\frac{1}{2}} \frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) \\
 & -\frac{1}{\Delta z} \left(\bar{K}_{i,j+\frac{1}{2}} - \bar{K}_{i,j-\frac{1}{2}} \right) = 0 \tag{15}
 \end{aligned}$$

위 식에서 $\psi_{ij}^{n+\frac{1}{2}}$ 은 기지값으로 x 방향-sweep에서 계산된 값이고, $\psi_{i,j}^{n+1}$ 은 $(n+1)$ Δt 시간 후에 계산되는 값이다.

위 식을 정리하면 다음과 같이 표시된다.

$$-a_{ij}^{(j)} \psi_{i,j+1}^{n+1} + b_{ij}^{(j)} \psi_{i,j}^{n+1} - c_{ij}^{(j)} \psi_{i,j-1}^{n+1} = d_{ij}^{(j)} \tag{16}$$

여기서

$$a_{ij}^{(j)} = \frac{\Delta t}{2(\Delta x)^2} \bar{K}_{i,j+\frac{1}{2}} \tag{17a}$$

$$b_{ij}^{(j)} = \bar{A}_{ij} + a_{ij}^{(j)} + c_{ij}^{(j)} \tag{17b}$$

$$c_{ij}^{(j)} = \frac{\Delta t}{2(\Delta x)^2} \bar{K}_{i,j-\frac{1}{2}} \tag{17c}$$

$$\begin{aligned}
 d_{ij}^{(j)} = & \bar{A}_{ij} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left(\bar{K}_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\psi_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - \psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \right. \\
 & \left. - \bar{K}_{i-\frac{1}{2},j} \frac{\psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \psi_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \bar{K}_{i,j+\frac{1}{2}} - \bar{K}_{i,j-\frac{1}{2}} \right) \tag{17d}
 \end{aligned}$$

이고, 역시 각 계수에 포함되어 있는 상첨자 (j)는 z 방향-sweep을 나타내기 위하여 사용되었다.

각 sweep에서 바로 전시간($n\Delta t/2$ 시간 전)에서 K 와 C 를 기지화 시켰기 때문에, 보다 정확한 해를 구하기 위해서는 각 sweep에서 반복법을 사용하였다. 즉 $(k+1)$ 번째 반복에서의 계산치가 k 번째 반복에서의 계산치를 비교하여 허용범위내에 들면 해당하는 sweep에서의 계산을 중지하도록 하였다.

3.3 초기조건 및 경계조건

초기조건은 평균해수면에서 모세관 압력수두 $\psi=-z$ 이고 계산영역내에는 중력만이 존재하는 것으로 설정하였다. 따라서 총수두 $h=0$ 이며, 이것은 초기에 침투류가 존재하지 않는 상태를 의미한다.

경계조건은 다음과 같이 세가지로 설정되었다. 첫째, 사면 하단부에서의 경계조건은 불투수층으로서 경계면에 수직인 방향으로 유속이 없는 것($v_n=0$, n 은 경

계면에 수직인 방향을 의미함)으로 설정되었다. 둘째, 사면의 경계조건은 이동경계로서 파랑모형으로부터 시시각각 계산되어지는 파의 쳐올림 또는 쳐내림 최고수위를 기준으로 하여 불투수층을 제외한 최고수위 이하에서는 정수압 법칙으로부터 계산된 수두로 설정하였다. 셋째, 지하수위가 기지일 경우에는 압력수두를 경계조건으로 사용하였다.

두 번째 조건에 대해 좀 더 부연하면 본 연구는 파랑과 침투류의 상호작용을 해석하고자 하는 것으로, 모형구성 기법상 복합모형을 사용하였다. 즉 침투류에 대해서는 수치모형을, 파랑의 쳐올림, 쳐내림 현상에 대해서는 Shuto(1972)의 이론해를 사용한 것이다. 비록 파랑모형이 이제껏 다른 침투류 수치모형에 대해서는 사면에 대한 이동경계조건으로 고려하는 형태이지만, 모형의 구성상 이론적인 모형과 수치모형의 복합형태이므로 두 모형은 대등한 관계를 가진다.

4. 복합모형의 해석결과

사빈내의 비정상 침투류 모형의 개발은 포화·비포화에 대한 기초식을 사용하고 정도 및 계산시간을 고려하여 연산방식(numerical algorithm)으로서는 ADI 유한차분법을 사용하였다.

식(1)에 대한 수치모형을 이용하여 실제의 현상을 확인하기 위해서는 복잡한 경계처리 및 전계산영역의 계산시간을 절약하기 위해 일반곡선 좌표계로 변환하고 계산을 수행하는 것이 바람직하다. 또한 파랑장도 천해역에서의 파랑변형 및 사빈에의 침투효과를 고려한 형태를 사용하여야 한다.

그러나 모형의 적용성 및 사빈내의 흐름의 물리적인 현상을 알기 쉽게 확인할 목적으로 직각좌표계에 의해 해석을 수행하고 파랑변형은 이론해에 의한 해석결과를 사용하여 복합모형에 의하여 계산을 수행하였다.

이론해를 통해 얻어지는 시시각각의 파랑 계산결과 중 본 연구에서 다루고자 하는 복합모형에서 필요한 것은 사면부의 상태이며, 사면부의 수위거동이 침투류 모형의 경계조건으로 작용한다. 즉 시간에 따라 달라지지만 수면과 접하는 부분에서 ψ 는 정수심 d 에 수면변위 η 가 더해져서 침투류계산의 경계조건으로 고려된다. 따라서 이론해에서 직접적으로 필요로 되는 값은 식(2)과 식(3)에 해당하는 x_1 및 z_1 이라 할 수 있다.

해석결과와 일예를 Fig. 3, Fig. 4에 나타냈다. Fig. 3은

처내림 상태에 대한 침투류 상황을 나타내고, Fig. 4는
 쳐오름 상태의 상황을 설명해 주고 있다. Fig. 3, 4는 침
 투류의 이동상황을 보다 확실히 살펴보기 위하여 사빈
 의 투수계수 값을 일반적인 사빈내의 투수계수보다

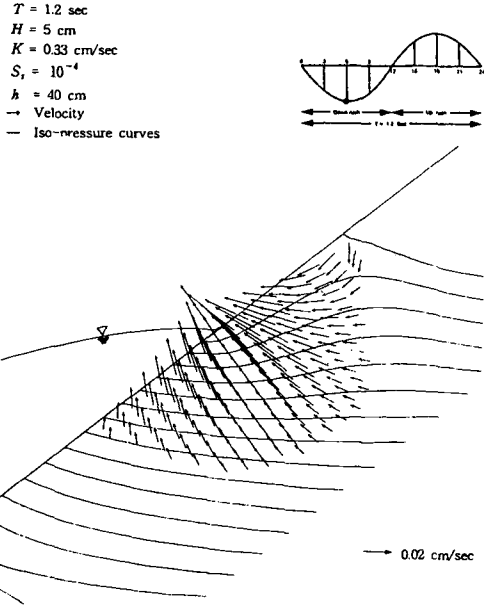


Fig. 3. Variation of groundwater-flow pattern in a sandy beach associated with sea-water elevation ($t = \frac{2}{8} T$).

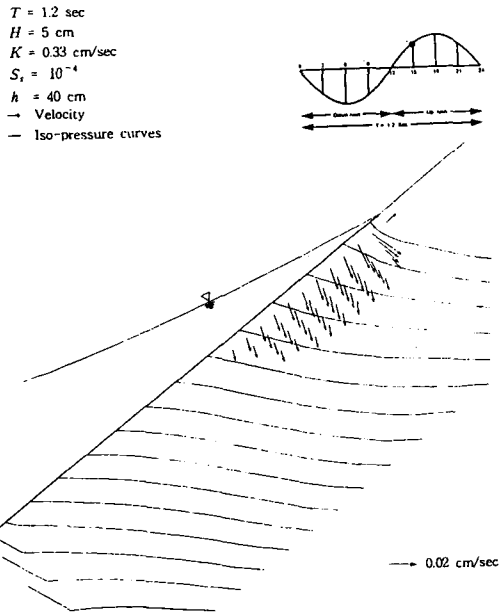


Fig. 4. Variation of groundwater-flow pattern in a sandy beach associated with sea-water elevation ($t = \frac{5}{8} T$).

크게 설정하여 계산해 본 것이다. 이 때의 투수계수의
 값은 0.33 cm/sec로서 굵은모래에 해당한다. 이것은 파
 랑의 한 주기를 24구간으로 잘게 나누어 얻어진 계산결
 과를 토대로 각 구간에 대한 파형이 외력으로 작용하였
 을 경우의 침투류 변동상황(특히 유속분포와 등압력수
 두 분포)을 살펴본 것이다. 여기서 사용한 파랑의 주기
 는 1.2 sec이며, 파고는 5 cm이다. 계산결과는 침투류 계
 산이 충분히 안정된 상태에 도달한 6초에서 7.2초 사이
 의 결과에 해당한다.

이해를 돕기 위하여 각 Fig. 3과 Fig. 4에 해당하는
 파의 위상을 그림에 함께 표시하였으며, 쳐오름 상태
 와 처내림 상태를 구분할 수 있고, 시간변동에 따른 침
 투류 거동을 확인할 수 있다.

파랑이 쳐오름 상태일 경우는 사빈중의 흐름의 움직
 임은 경사면에서 수위의 상승에 의해 사빈방향으로 침
 투류가 작용하기 때문에 해안선을 향하는 방향의 운동
 을 하고 있다. 처내림 상태의 경우 정수면 상태보다 수
 위가 저하하고, 쳐오름 상태의 경우와 반대로 사빈중
 의 흐름도 외해쪽으로의 운동을 나타내고 있다. 다시
 말해서 쳐오름 상태에서는 침투현상이, 처내림 상태일
 경우는 침출현상을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 포화투수계수를 달리했을 경우의 계산 결
 과이다. 즉 Fig. 3에서 포화투수계수만 $K_s = 0.33 \text{ cm/sec}$

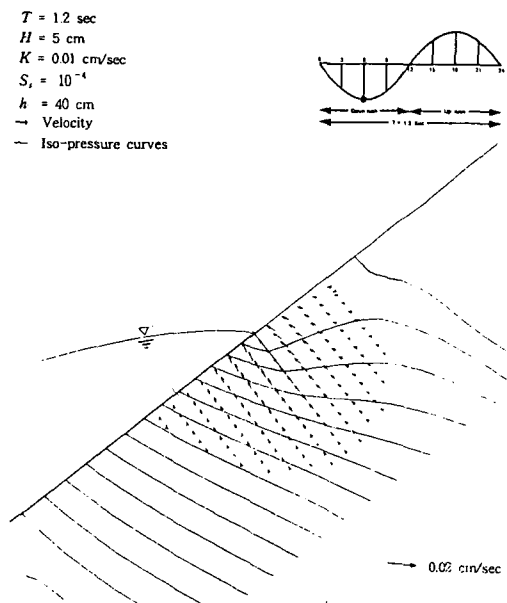


Fig. 5. Groundwater-flow pattern in a sandy beach (down-rush).

에서 0.01 cm/sec로 변경하였고, 나머지의 모든 조건은 같게 두었을 때의 계산 결과이다. 이때 $K_p=0.01$ cm/sec는 비교적 가는 모래에 대한 포화투수계수에 해당한다.

Fig. 3과 Fig. 5의 비교에서 알 수 있듯이 포화투수계수를 달리 했을 경우, 침투류의 유속 및 유향은 매우 민감하게 반응하므로 침투류 특성이 포화투수계수의 값에 지배된다는 것이 계산상 확인되었다. 비저류계수의 차이에 의해서는 유속 및 유향은 육안으로 확인될 정도의 변동이 없으나, 계산자체의 안정성에는 영향을 미친다. 따라서 수치계산에 의해 침투류 유향을 정도 높게 구하기 위해서는 현장실험을 통한 실제적이고 명확한 투수계수 및 비저류계수의 설정이 중요하다고 판단된다.

5. 결 론

해빈에서 해안침식방지공법으로 제안되고 있는 방법중 배수층 설치공법이 새로운 방법으로 고려될 수 있다. 이러한 공법이 경제성을 가지고 있다는 것을 밝히기 위해서는 여러가지 방법이 사용될 수 있으나, 여기서는 수치기법을 이용하였다. 즉 파랑모형을 Shuto (1972)의 해석해를 이용하였고 침투류 모형은 포화-비포화흐름을 설명하는 Richards식을 이용하여 복합모형(hybrid model)을 구성하여 그 해석기법을 개발하였다. 가상적인 상황을 설정하여 복합모형에 대한 수치 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 전빈부근의 침투류 경향을 검토하기 위하여 침투류 수치모형을 수립하였고 이때, 외력으로 작용하는 파랑모형과를 조합한 단면 2차원 복합모형을 개발하였다.

(2) 파랑과 침투류가 결합된 복합모형으로 해석한 해빈에서의 흐름장에 가장 민감한 영향을 미치는 것은 다공성 매질 즉 모래의 포화투수계수임을 확인할 수 있었다. 따라서 해빈에 포화투수계수가 아주 높은 배수층을 설치함으로써 파의 쳐오름이 발생하였을 때 해빈에서 지하수위를 효율적으로 저하시킬 수 있을 것이라는 것을 간접적으로 알 수 있었다.

(3) 배수층내의 투수계수, 압력수두의 경계조건 등을 조정하고, 계산에 필요한 제변수를 실제현장에서

정확히 조사하여 수치모형실험시 사용한다면, 해안전빈내의 지하수위분포 및 침투류 경향이 재현 가능함을 복합모형으로부터 알 수 있었다.

사 사

본 연구의 일부분은 일본 테트라(주)의 사토 실장과의 공동연구 중 수행된 것임을 밝히고, 자료를 제공해 준 항만기술연구소의 가토실장에게도 감사를 표하는 바이다.

참고문헌

- Averjanov, S.F., 1950. About permeability of subsurface sites in case of incomplete saturation, *Engineering Collection*, Vol. VII.
- Davis, G.A., Hanslow, D.J., Hibbert, K. and Nielsen, P., 1992. Gravity drainage: A new method of beach stabilization through drainage of the watertable, *Proc. 23rd Conf. on Coastal Engineering*, pp. 1129-1141.
- Saville, T., 1952. Wind set-up and waves in shallow water, *Tech. Memo. 27*, U.S. Army Beach Erosion Board, Washington, D. C., 36 pp.
- Shuto, N., 1972. Standing waves in front of a sloping dike, *Coastal Engineering in Japan*, 15, pp. 13-23.
- 中村充, 大西亮一, 1974. 波動下における海底砂床内の浸透について, *農業土木 試験場報告*, 第12號, pp. 163-182.
- 赤井 浩一, 大西 有三, 西恒 誠, 1977. 有限要素法による飽和-不飽和 浸透流解析, *日本 土木學會論文集*, 第264號, pp. 87-96.
- 谷誠, 1985. 出地流域の流出特性を考慮した一次鉛直不飽和浸透流の解析, *日本林學會誌*, Vol. 67, pp. 449-460.
- 今村文彦, 後藤智明, 1986. 差分法による律波數値計算の打ち切り誤差, *土木學會論文*, 第375號/II-6, pp. 70-74.
- 中村 充, 1972. 複合断面における波の打ち關する研究, 第19會 *海岸工學講演會論文集*, pp. 16-20.
- 佐藤勝弘, 金圭漢 等, 1995. 透水層埋設による前浜付近の波浪, *浸透流豫測計算*, *海岸工學論文集*, 42(2), pp. 731-735.
- 日野幹雄, 1989. 洪水の 數値豫報, 森北出版株式會社.