한국해양공학회지 제21권 제3호, pp 8-15, 2007년 6월(ISSN 1225-0767)

하구에 형성된 소규모 모래톱의 수질정화 기능에 관한 기초적 연구

박상길 · 김병달 · 정성일
부산대학교 토목공학과

An Experimental Basic Study of Water Purification Function due to Spit in Small Estuary

SANG-KIL PARK, BYUNG-DAL KIM AND SEONG-IL JEONG
Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Purification of water quality 수질정화, Density flow 밀도류 유동, Distribution of concentration 농도분포, Width of sand spit 하구사주의 폭, Influx prevention of salt wedge 염수쐐기 침입방지

ABSTRACT: *This study is intended to examine the relationship between the magnitude of sand spit in the estuary of the stream and improvement of the quality of water that flows into the sea, by means of hydraulic experimentation. In order to determine the effect of improvements of water quality when river flow is stagnant, the estuary flows into the sea through the small sand spit, and a two-dimensional physical model experiment was carried out. Distribution of concentration was decreased in response to an increase in length of sand spit and time. The experimental results are compared with theoretical results, based on the solution of the equation. Also, there are functions of influx prevention of salt wedge and purification of pollution water due to sand spit in small estuary.*

1. 서 론

우리나라 소하천의 대부분은 일반적으로 하천 폭이 협소하고 하천의 바닥경사가 급한 관계로 홍수 시에 월류(Overflow)로 인한 하천의 범람이 발생하고 동시에 하상의 세굴이 일어나 제방의 붕괴가 발생되는 자연재해의 위험이 상존하고 있다. 또, 하수처리시설이 없는 지역에서는 소하천(본 연구에서 소하천은 하천법 7조와 소하천 정비법제 2조로 정의되는 하천을 말함)에 가정오수 및 축산폐수가 무분별하게 유입되어 소하천의 오염이 심화되고 있는 실정이다. 그러나, 최근에 소하천의 유지관리가 강화되면서 소하천의 수질에 대한 관리도 강화되었다. 현재까지 소하천에 대한 연구경향은 대부분이 산간지방이나 중상류에서 수문학적인 수량을 정량화 시켜 홍수량 유출 등의 방재(치수)측면에 국한되었고, 소하천의 수질을 취급하는 친환경측면의 연구는 미비하였다. 과거의 자연하천은 물이 흘러가면서 수질의 자정작용을 가지고 있어 다소간의 오염물질이 유입된다 하더라도 시 · 공간적으로 얼마 경과하지 않아 정화되는 관계로, 그 동안 하천수의 수질문제는 크게 관심을 가지지 않고 지나왔지만, 시대의 변화에 따라 연안해역이 위락시설지역으로 이용됨에 따라 환경오염방지라는 시민운동이 전개되어 전체 하천에 대한 수질등급을 규제하는 요구가 날로 증가되고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해 도심을 관통하는 하천에 인위적으로 깨끗한 수질을 갖는 일정량의 하천유량을 공급하는 소하천이 만들어 졌다. 이러한 방법은 자연하천으로서의 정화기능을 갖는 영구적인 방법 보다는 인위적으로 한시적인 대안으로 이용되고 있다. 소하천의 수질을 개선하기 위해 완벽한 시설을 갖추어 수질을 정화시키기는 매우 어려운 실정이지만, 깨끗한 연안환경을 만들자는 각계의 요청이 요구되고 있는 시점에서 오수가 직접 바다로 유출되고 있는 상황이 발생되고 있으므로 관리자는 오수를 차단하거나 자정작용에 의한 수질정화 노력이 현실화 되도록 노력해야 한다. 이러한 지역은 대부분이 연안해역의 소하천 하구 호 주변이다. 이들 지역에서는 사주의 형성과 붕괴 등이 계절에 따라서 특성을 달리하고 있기 때문에 방재와 친환경 측면에서 연구가 동시에 이루어져야 한다.

환경부(1999)는 하상의 둔치에 식생을 통한 하천환경 개선효과에 대한 하천공법의 개발의 연구를 수행하였고, 부산광역시(2003)에서도 동천에 관한 기본계획의 개념이 방재를 겸한 친환경 자연하천 정비계획으로 되어있다. 특히, 우리나라와 같이 토지의 이용률이 높은 국가에서 소하천의 하구부가 도심에 가까우면 가까울수록 시민의 활동공간으로서 이용도는 높다. 동시에 도시형 소하천 하구로 변화되어 하구의 수질이 악화되어 가는 현상을 볼 수 있다. 이러한 수질을 개선하고자 하는 수질개선 효과를 극대화 시킬 수 있는 방안에 대한 연구는 이루어지지 않고 있어 연구의 시급성을 요구하고 있다. 일반적으로 소하천의 하구에 토사가 퇴적되어 하천의 횡 방향으로 길고 종 방향으로 폭이 좁은 일정 규모의 육지를 하구사주(Sand spit)라 한다. 사주에 의해 하구호가 형성되어 하천유량이 바다로 직접 유출되지 못하고 일단 정체된 상태에서 호소의 수위와 바다의 수위의 상호관계에 의해 호소의 유량이 퇴적된 사주 층을 통과하여 지하수의 흐름으로 바다로 흘러가는 경우에

교신저자 박상길: 부산광역시 금정구 장전동 산30번지
051-510-2427 sakpark@pusan.ac.kr

대하여 국한시켜 이 지역에 발생되는 지하유동 관계를 기술하기로 한다. 즉, 오염된 호소에서 유량이 사주 층을 통과하므로 인해 수질정화가 되는 과정을 해석하였다. 이를 위해 지하 밀도류 유동이론을 적용하여 해석을 실시하고 2차원 이동상 지하 침투류(복류수 흐름) 수리실험을 실시하고자 하였다. 그리고, 하구가 폐색된 사주를 통과하는 지하 침투류의 시간별 탁도와 농도 변화를 로다민B($C_{28}H_{31}ClN_2O_3$)를 투여하여 측정하고, 이를 분석하여 친환경적 연구로 수위상승을 유발하지 않으면서, 동시에 수질개선에도 기여하는 하구폐색 퇴적 모래톱층의 임계규모를 추정하고자 한다. 따라서, 본 연구는 하구사주가 수질정화 기능을 갖는 기초적 연구로서 기존의 지하밀도류 이론을 하구사주에 적용하여 수리실험을 통해 하구사주의 수질정화 효과를 제시하는 데 목적이 있다.

2. 모델화에 이용된 기본식

2.1 해안지대의 밀도류 유동

우리나라와 같이 국토가 협소한 국가의 해안선에 입지한 소하천의 하구는 Fig. 1과 같이 갈수기에 하구폐색의 토사퇴적층이 형성되고 있다. 연구목적과 필요성에서 언급된 내용을 연구하기 위해 이곳에서 발생되는 흐름을 모델화 하였다. 하구폐색에 의해 자연적으로 생성된 하구호에 바다의 염수가 조석에 의해 하구호로 유입되는 과정을 모델화 하면 Fig. 1과 같다. 홍수시를 제외한 평상시 또는 갈수기에 소하천의 하구에서 흔히 볼 수 있는 현상으로, 하구 폐색으로 생성된 하구호를 폭이 넓은 제방형태로 단순화시킨 것이다. 기존에 모델화 된 이론을 현장에 적용하였다.

하구호의 수위가 해수위 보다 높을 경우 지하밀도류의 기본방정식을 유도하는 과정은 담수가 해안부근에서 지하를 침투하여 외해측으로 흘러가는 현상을 해석하기 위해, Fig. 2와 같이 해수와 담수가 서로 만나는 평균해수면 지점을 원점으로 잡고, 원점에서 하천의 상류방향으로 x축, 원점에서 연직하향을 수심방향인 z축으로 하여 지하밀도류 흐름을 좌표화 하였다.

지하밀도류가 육지에서 바다로 흐르고 있는 경우, 해안선 부근에서 우물을 굴착하면 일정한 깊이까지는 담수층이 되지만, 이 보다 깊어지면 염수층이 된다. 이때 염수층은 쐐기모양으로 육지로 향하여 침입하는 데, 담수층의 흐름을 일정한 형상의 흐름으로 가정하면 담수층의 압력분포는 정수압 분포로 생각할 수 있다.

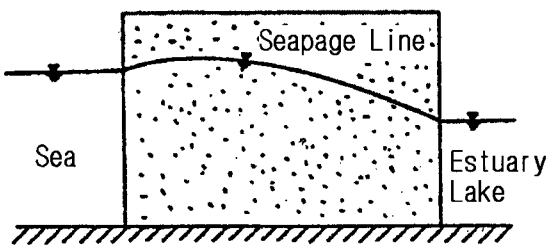

Fig. 1 The sketch of ground water flow in estuary

담수의 밀도를 ρ, 염수의 밀도를 $\rho+\Delta\rho$, 평균해수면에서 담수층의 자유표면까지의 높이를 ζ, 자유표면에서 경계면까지의 깊이를 $\zeta+h$로 하면 경계면에 있어서 압력강도 p는 식 (1)과 같다.

$$p = \rho g(h+\zeta) \tag{1}$$

염수층은 정상상태로 정지하고 있다고 가정하기 때문에 바다에서의 경계면에 있어서 압력강도 p는 식 (2)와 같다.

$$p = (\rho+\Delta\rho)gh \tag{2}$$

식 (1)과 식 (2)로부터 다음 식 (3)과 같은 Herzberg의 조건이 된다.

$$h = \frac{\zeta}{\varepsilon}(\varepsilon = \Delta\rho/\rho) \tag{3}$$

Fig. 3은 해안의 경계에서 우물을 양수할 때의 현상을 도시하였다. Fig. 3과 같이 해안 부근에서 우물을 굴착하여 양수하는 경우를 생각한다. 이때 우물의 자유표면은 밑으로 저하하기 때문에 우물주변의 염수층 경계면이 상승하여 염수를 양수하게 될 위험이 발생한다. 양수시 우물 자유표면의 저하량을 $\Delta\zeta$라 하면 경계면에서의 수위 상승량은 Herzberg의 조건에서 식 (4)와 같이 주어진다.

$$\Delta h = \frac{\Delta\zeta}{\epsilon} \tag{4}$$

해안선 부근 또는 우물주변에 형성되는 침투류는 일정한 흐름으로 가정하여 Fig. 2와 같은 지하밀도류에 대한 기본방정식을 유도하기 위해 다음과 같은 조건을 가정하였다.

① 저면은 불투수층(Impervious layer)이며 지하 밀도류가 흐르는 투수층은 단일 모래층으로 한다.

② 투수층은 자유표면을 갖고 흐름은 2차원으로 한다.

③ 투수층과 염수층의 경계면은 명확하고 염분의 확산

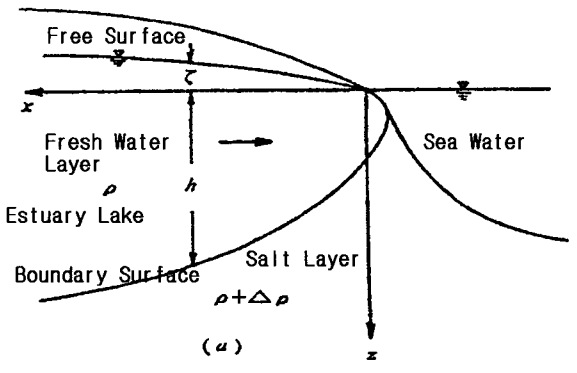

Fig. 2 The flow of density water in estuary

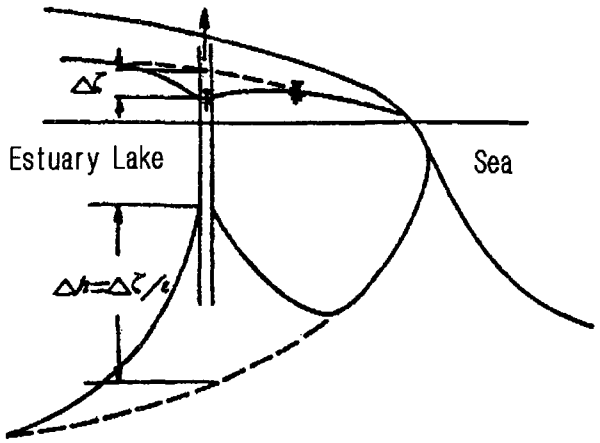

Fig. 3 Water surface set up of boundary layer on pumping in estuary

(Diffusion)은 무시하였다.

지금 불투수층에서 해면까지의 높이를 h_s, 투수계수를 k_p라고 두고 각층의 수리제원을 Table 1과 같이 정의한다.

Fig. 4와 같이 하천에서 바다로 흐르는 지하밀도류의 좌표계를 잡고, 하구를 폐쇄시킨 사주 층을 침투하여 바다로 흐르는 지하밀도류를 생각한다. 이때의 흐름이 담수 층과 염수 층 모두에서 발생하여 각각 Darcy의 법칙이 성립한다고 하면 담수층과 염수 층의 유속 u_1과 u_2는 식 (5)와 같다.

$$u_1=-\frac{k}{\rho_1 g}\frac{\partial p_1}{\partial x}$$

$$u_2=-\frac{k}{\rho_2 g}\frac{\partial p_2}{\partial x} \tag{5}$$

상층과 하층의 압력분포는 식 (6)과 같다.

$$p_1=\rho g(z+\zeta)$$

$$p_2=\rho_1 g(h_1+\zeta)+\rho_2 g(z-h_1) \tag{6}$$

$$h_1+h_2=h_s \tag{7}$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하여 ε2 을 무시하고, 식 (7)을 이용하면 식 (8)과 같은 운동방정식이 얻어진다.

$$u_1=-kp\frac{\partial \zeta}{\partial x}$$

$$u_2=-k[(1-\epsilon)\frac{\partial \zeta}{\partial x}+\epsilon\frac{\partial h_2}{\partial x}] \tag{8}$$

Table 1 The items of hydraulics density flow

Items	Up B.L.	Under B.L.
Depth of water	$\zeta+h_1$	h_2
Density	ρ_1	$\rho_2=\rho_1+\Delta\rho$
Velocity	u_1	u_2
Still waterf depth	h_{10}	h_{20}
Pressure	p_1	p_2

(B.L: boundary layer)

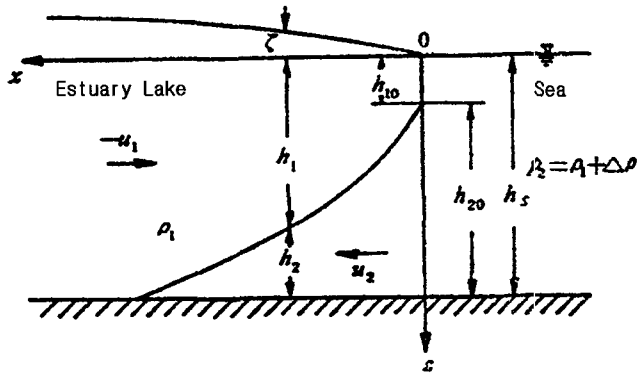

Fig. 4 Ground water density flow from river to sea

한편 공극률을 λ로 하고 담수층과 염수층에 관한 연속방정식을 수립하면 식 (9)와 같다.

$$\lambda\frac{\partial}{\partial t}(\zeta+h_s-h_2)+\frac{\partial}{\partial x}[u_1(\zeta+h_s-h_2)]=0$$

$$\lambda\frac{\partial h_2}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(u_2 h_2)=0 \tag{9}$$

식 (8)을 식 (9)에 대입하여 u_1과 u_2를 소거하면 ζ와 h_2에 관한 연립방정식이 구해진다. 계산중에 ζ와 h_2에 대해서 ε의 차수를 고려해서 미소항을 생략하고 h_2는 일정하다고 하면 일정한 흐름의 지하밀도류에 대한 기본방정식은 식 (10)과 같다.

$$-\frac{\lambda}{k}\frac{\partial h_2}{\partial t}-h_s\frac{\partial^2\zeta}{\partial x^2}+\frac{\partial}{\partial x}(h_2\frac{\partial \zeta}{\partial x})=0$$

$$\frac{\lambda}{k}\frac{\partial h_2}{\partial t}-\frac{\partial}{\partial x}(h_2\frac{\partial \zeta}{\partial x})-\frac{\epsilon}{2}\frac{\partial^2 h_2^2}{\partial x^2}=0 \tag{10}$$

일반적으로 비정상류는 식 (10)을 만족해야 하고 상층의 유량 Q_1과 하층의 유량 Q_2는 절대값이 같고 방향만 반대이다. 따라서 바다에서 하천으로 흐르는 역전류의 경우도 취급이 가능하다. 식 (10)에서 ζ가 h_1에 대해 ε의 차수라면 Q_1과 Q_2를 이용해서 연속방정식을 다시 쓰면 식 (11)과 같다.

$$\lambda\frac{\partial h_1}{\partial t}+\frac{\partial Q_1}{\partial x}=0$$

$$\lambda\frac{\partial h_2}{\partial t}+\frac{\partial Q_2}{\partial x}=0 \tag{11}$$

$$Q_1=u_1h_1$$

$$Q_2=u_2h_2 \tag{12}$$

식 (11)에 식 (7)을 대입하여 정리하면 다음 식 (13)이 된다.

$$\frac{\partial(Q_1+Q_2)}{\partial x}=0$$

$$Q_1+Q_2=C(t) \tag{13}$$

여기서 $C(t)$는 적분상수로서 시간만의 함수이고 역전류의 경우는 $C(t)$=0이 된다(Tamai and Shima, 1967).

따라서 식 (10)의 양식을 합하여 적분하면 식 (14)가 된다.

$$h_s\frac{\partial\zeta}{\partial x}+\frac{\epsilon}{2}\frac{\partial h_2^2}{\partial x^2}=C(t) \tag{14}$$

여기서 $C(t)$=0일 때가 역전류의 경우에 해당한다.

이 경우 관계식을 이용해서 식 (10)으로부터 ζ를 소거하면 역전류에 대한 기본방정식으로서 식 (15)가 유도된다.

$$\frac{\lambda}{k}\frac{\partial h_2}{\partial t}-\frac{\varepsilon}{2}\frac{\partial^2 h_2^2}{\partial x^2}+\frac{\varepsilon}{2h_s}\frac{\partial}{\partial x}\left(h_2\frac{\partial h_2^2}{\partial x}\right)=0 \tag{15}$$

2.2 정상류

2.2.1 지하에 생기는 염수쐐기

Fig. 2에 표시한 것과 같이 해안부근에서는 염수층이 쐐기모양으로 육지로 침입하고 있다. 육지에서 담수유량을 Q_L로 해서 Fig. 5와 같은 흐름을 생각해서 정상류라고 한다면 하층은 정지하고 있기 때문에 운동방정식은 식 (8)에서 식 (16)과 같이 되고 연속방정식은 식 (17)과 같이 된다.

$$u_1=-k\frac{\partial\zeta}{\partial x} \tag{16}$$

$$u_2=0$$

$$u_1(h_1+\zeta)=Q_L \tag{17}$$

또, Herberg의 조건에서 이 조건에 맞는 경우를 적용하면 식 (18)이 된다.

$$\zeta=\varepsilon h_1 \tag{18}$$

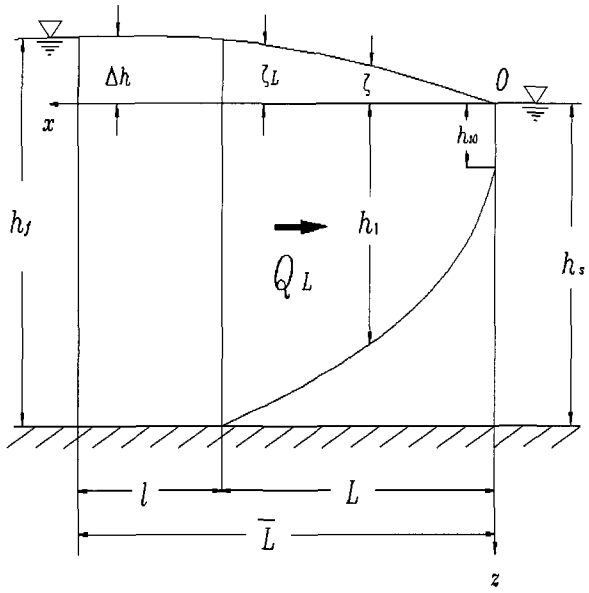

Fig. 5 The salt wedge of steady state flow

식 (16), 식 (17), 식 (18)의 3식에서 u_1, h_1을 소거하고 적분을 실시하면 식 (19)와 같다.

$$\frac{1+\varepsilon}{2\varepsilon}\zeta^2=-\frac{Q_L}{k}x+C \tag{19}$$

경계조건 $x=0$, $\zeta=0$이면 C=0이므로 식 (19)는 식 (20)과 같다.

$$\frac{1+\varepsilon}{2\varepsilon}\zeta^2=-\frac{Q_L}{k}x \tag{20}$$

식 (20)에서 자유표면은 포물선 형태이고, 만약 담수유량인 Q_L이 주어지면 식 (18)에서 경계면 형상을 구할 수 있다. 실험실에서 이런 형상을 재현시키기 위해서는 Fig. 5와 같은 수심 h_f의 담수조와 수심 h_s의 염수조를 투수층으로 연결시켜 실험을 실시한다. 지금 수조사이의 거리를 $\bar{L}$로 하고 염수쐐기의 침입길이를 L로해서, $l=\bar{L}-L$로 두면 $L<x<L+l$의 범위에서 담수만이 존재하기 때문에 Q_L는 식 (21)로 쓸 수가 있다.

$$|Q_L|=k\frac{h_f^2-(h_s+\zeta_L)^2}{2l} \tag{21}$$

여기서, ζ_L은 $x=L$에서 자유표면을 높이면 $\zeta=\varepsilon h_L$로 표시된다. 한편 식 (20)은 식 (22)로 된다.

$$-\frac{Q_L}{k}L=\frac{1+\varepsilon}{2\varepsilon}\zeta_L^2=\frac{\varepsilon(1+\varepsilon)h_s^2}{2} \tag{22}$$

식 (21)과 식 (22)에서 식 (23)로 쓸 수가 있다.

$$2\frac{|Q_L|}{k}=\frac{h_f^2-(1+\varepsilon)h_s^2}{L} \tag{23}$$

식 (23)에서 양쪽수조의 수심, 수조간의 거리, 밀도 차에 의한 담수유량이 구해진다. 또 $\zeta_L \fallingdotseq \Delta h$로 둘 수 있는 경우 담수 유량은 근사적으로 식 (24)와 같다.

$$|Q_L|=\frac{k}{2L}\frac{1+\varepsilon}{\varepsilon}(\Delta h)^2 \tag{24}$$

여기서, Δh는 양수조간의 수위차이다.

또, 염수쐐기의 길이 L은 식 (22)에서 식 (25)와 같다.

$$L=\frac{k\varepsilon(1+\varepsilon)}{2|Q_L|}h_s^2 \tag{25}$$

2.2.2 해안선에서의 연직 유속의 효과

2.2.1에서 언급한 조건에 대한 해는 해안선에서 어느 정도 떨어진 곳에서는 잘 일치하지만, 식 (18)과 식 (20)에서 $x=0$로 두면 ζ와 h_1은 0이 되어, 바다에서의 담수의 유속은 무한대로 되는 불합리한 상황이 발생된다. 이유는 해안선 부근에서 경계면의 경사가 급하여 연직 유속이 무시할 수 없음에도 불구하고, 일정한 형상의 흐름으로 가정했기 때문이다. Henry(1959)는 2차원 흐름의 엄밀한 해석을 실시하였고, 또 Glover(1959)는 유사한 경계조건에 대한 근사 해를 구하였다. Rumer and Harleman(1963)은 정해진 영역에 대해서 Dupuit의 가정으로부터 출발해서 근사식을 구하고, 실험과 비교해서 좋은 결과를 얻고 있다. 지금 담수층의 임의점 연직유속을 w_1이라 하면 연속방정식으로부터 식 (26)과 같이 쓸 수 있다.

$$w_1=-\int_{-\zeta}^{z}\left(\frac{\partial u_1}{\partial x}\right)dz+[w_1]_{z=-\zeta} \tag{26}$$

한편 식 (16), 식 (17), 식 (18)에서 식 (27)로 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial u_1}{\partial x}=\frac{Q_L^2}{k}\cdot\frac{1+\varepsilon}{\varepsilon}\cdot\frac{1}{(h_1+\zeta)^3} \tag{27}$$

상식을 식 (26)에 대입해서 적분을 하면 w_1의 근사식인 식 (28)을 구할 수 있다.

$$w_1=-\frac{Q_L^2}{k}\cdot\frac{1+\varepsilon}{\varepsilon}\cdot\frac{z+\zeta}{(h_1+\zeta)^3} \tag{28}$$

여기서, 자유표면의 변화는 경계면의 값과 비교해서 작다고 하면 $[w]_{z=-\zeta}=0$로 된다. 한편, 연직방향의 연속방정식은 Darcy의 법칙에서 식 (29)와 같다.

$$w_1=-k\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{p_1}{\rho_1 g}-z\right) \tag{29}$$

식 (28)을 식 (29)에 대입해서 적분을 하면 연직유속을 고려한 경우의 담수층중의 압력분포는 식 (30)과 같다.

$$p_1=\rho_1 g(z+\zeta)+\frac{\rho_1 g Q_L^2}{2k^2}\cdot\frac{1+z}{\varepsilon}\cdot\frac{(z+\zeta)^2}{(h_1+\zeta)^3} \tag{30}$$

$x=0$에 있어서 담수 층의 두께를 h_{10}로 하면 , h_{10}는 경계면상에서 담수 층에서 측정한 압력의 강도크기와 염수탱크로부터 측정한 압력의 크기가 동일하다는 조건에서 다음과 같이 구해진다.

$$\rho_1 g h_{10}+\frac{\rho_1 g Q^2}{2k^2}\cdot\frac{1+\varepsilon}{\varepsilon}\cdot\frac{1}{h_{10}}=(\rho_1+\Delta\rho)g h_{10}$$

$$\therefore h_{10}=\frac{|Q_L|}{k}\cdot\frac{1}{\varepsilon}\sqrt{\frac{1+\varepsilon}{2}}\fallingdotseq\frac{|Q_L|}{\sqrt{2}\,\varepsilon k} \tag{31}$$

식 (18)과 식 (19)에서 식 (32)를 구할 수 있다.

$$\frac{h_1^2}{2}=-\frac{Q_L}{\varepsilon(1+\varepsilon)h}x+C \tag{32}$$

식 (32)에서 $x=0$, $h_1=h_{10}$ 이므로 C가 결정된다.

따라서 , 경계면상은 식 (33)과 같다.

$$\frac{h_1^2}{2}=-\frac{Q_L}{\varepsilon(1+\varepsilon)k}x+\frac{h_{10}^2}{2} \tag{33}$$

식 (33)에 식 (31)을 대입해서, 무차원화 시키면 식 (34)가 된다.

$$\frac{\varepsilon k}{|Q_L|}h_1=\left(2\frac{\varepsilon k}{|Q_L|}x+0.5\right)^{\frac{1}{2}} \tag{34}$$

식 (34)가 해안선에서 연직유속의 효과를 고려한 경우의 경계면 형상을 나타내는 식이다.

Rumer and Harlmen(1963)은 피압상태의 경계면에 대한 근사식으로 식 (35)를 제안하고 있다.

$$\frac{\varepsilon k}{|Q_L|}h_1=\left(2\frac{\varepsilon k}{|Q_L|}x+0.55\right)^{\frac{1}{2}} \tag{35}$$

Fig. 6은 식 (34)의 경계면 형상을 도시한 것이다.

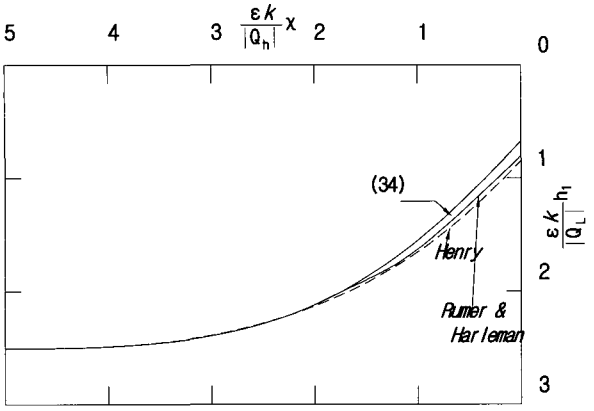

Fig. 6 The results of equation (34) solution of boundary layer shape

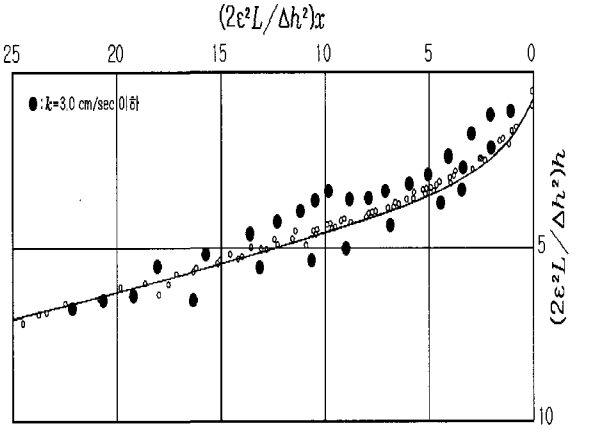

Fig. 7 The result of theoretical value compared with physical values

즉, 다시 상세하게 설명하면 Fig. 5의 염수와 담수가 경계면를 이루는 담수층의 깊이 h_1값을 염수쐐기의 길이L의 변화에 대해 도시한 것이다. $h1$이 변화되는 형상을 표현하면 식 (33)과 같다. 식 (33)을 식 (31)로 무차원 시켜 얻은 식 (34)를 횡축의 염수쐐기의 길이무차원 값을 변화시키면서 종축의 담수층의 깊이 무차원 값을 구하여 도시한 것이 Fig. 6 이다.

결국 염수와 담수의 경계면의 형상을 도시한 것이다. Henry(1959), Rumer and Harlmen(1963) 및 식 (34)의 상호간의 해를 구한 것이며, 각각에 대한 결과는 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 담수와 염수가 만나는 경계층에서 형성되는 경계층 형상을 수심(Δh)와 경계층을 형성하는 수평길이(L)로 무차원 시켜 종축은 수심을 횡축은 거리를 변화시키면서 도시한 것이다. 실선은 담수와 염수의 경계면에 형성되는 염수쐐기의 형상을 무차원 시켜 구한 것이고, 흰 원은 플라스틱인 투수계수 k =0.5cm/sec, 검은 원은 k=2.45cm/sec인 모래를 사용하여 Fig. 8의 실험에서 얻은 실험값을 도시한 것이다. 자유표면의 경계면 형상과 식 (34)의 경계면 형상의 결과를 비교한 것이다. 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7 에 의하면 투수계수가 큰 경우는 실선과의 오차가 발생하고 있으나 전반적으로 실선과 유사한 값으로 경계층의 형상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3. 수리실험

3.1 밀도류의 경계면 형성 수리실험

본 수리모형 실험은 길이 25m, 높이 1m, 폭0. 6m의 조파 수조내부에 조파를 하지 않을 경우는 길이 320cm, 폭 30cm, 높이 50cm, 두께 0.5cm 아크릴판으로 제작하였고, 조파를 실시한 경우는 240cm, 폭 30cm, 높이 50cm, 두께 0.5cm 아크릴판으로 제작하였다. 유체는 일정한 염도를 갖는 염수와 담수로서 두 유체간의 밀도차를 보이기 위해 염수수조에서 염수를 방류하여 밀도류를 형성하게 하였다. 사진촬영과 육안관찰을 위하여 로다민B를 염수에 주입하여 염수와 담수가 층을 이루는 경계면을 형성하도록 하였다. 물론 염수가 모래투수층을 통과하여 흘러가기 위해 바닥경사를 1/50으로 하였다. Fig. 8은 밀도류의 수리실험 장치의 제원을 간단히 설명한 것이다. 계측기기는 탁도계(DRT-15CE), 농도계측기(SCM-7540E), 염분측정(SCLF-39)를 사용하였다. 모형의 제작이 완료된 후에는 수리실험 하도의 대상영역을 결정하였다. 하상제작 단계에서는 수리실험 하도의 바깥쪽에 50cm 높이의 아크릴 판으로 측벽을 설치하여 수로전체의 윤곽을 설정하고 염수가 바닥으로 침투하여 흘러가는 누수현상도 차단하였다. 수리실험 하도의 안쪽에는 실제 소하천에 발생되는 하구폐색 폭을 가정하여 k=2.45cm/sec 모래를 소정깊이로 포설하였다. Fig. 8은 조파를 실시한 경우의 실험장치를 간단하게 설명한 것이다. 실험은 시행오차를 거치면서 염수가 사주를 통과하면서 형성되는 염수 쐐기형성 곡선을 조사한 것이 Fig. 8에 도시된 식 (34)의 곡선과 유사한 형상을 볼 수 있었다. 따라서 염수와 담수가 만나는 곳에서의 경계면 형상은 포물선 형상임을 확인하였다.

3.2 하구사주 폭의 변화에 따른 수질정화 효과

하구사주를 통과하는 오염물질이 하구사주 폭에 의해 어느 정도 정화되는가를 검토하기 위해 하구사주의 폭을 변화시키면서 하구사주를 통과한 일정지점에서 통과한 오염물질의 농도변화를 측정하여 도시한 것이 Fig. 9이다.

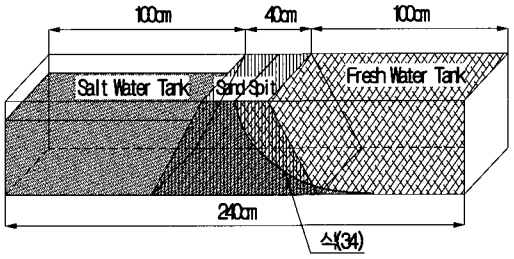

Fig. 8 The equipment of density flow and figure of salt wedge in the boundary layer.

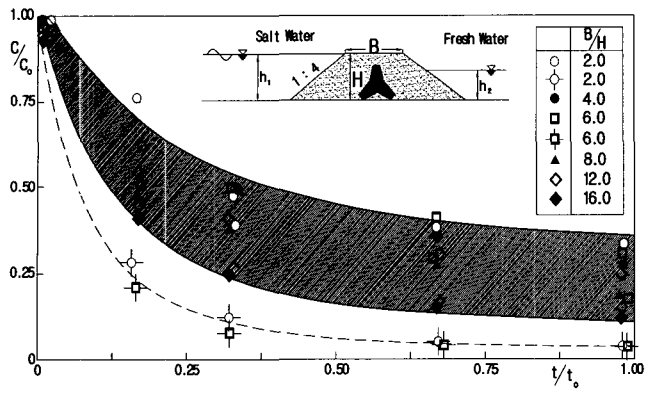

Fig. 9 Concentration of distribution according to width of sand spit

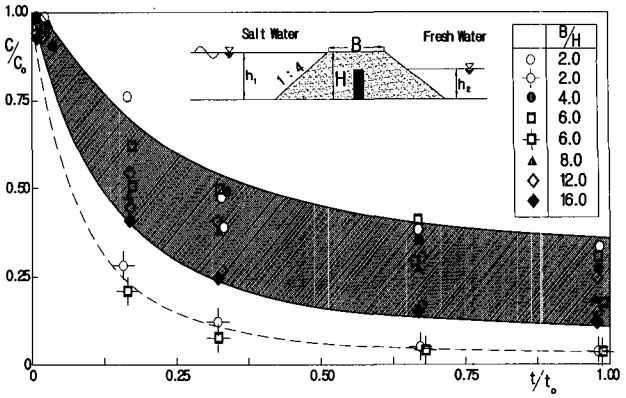

Fig. 10 Concentration of distribution according to passed time of sand spit

Fig. 9의 종축은 관측농도를 초기농도로 무차원 시킨 값이며, 횡축은 하구사주의 상부 폭 B를 하구사주의 높이 H로 무차원시킨 값이다. 파라메타로서는 농도측정 시간 t를 사주 폭을 통과하는데 걸리는 시간 to로 무차원 시킨 값이다. 검게 칠한 부분은 동일한 값 B/H에 대해 C/Co값의 상한 값과 하한 값으로 최대 분포 폭을 의미한다. 즉, 농도분포 오차범위를 의미한다. Fig. 9에 의하면 하구사주의 폭 B가 증가 할수록 농도는 감소하고 있다. 즉, 초기농도는 사주의 폭이 넓어지면 농도는 지수적으로 감소한다. B/H=5 보다 큰 값에 대해서는 농도의 감소효과가 일정한 값을 갖는다. 따라서 하구에 생성된 사주가 오염물질을 정화시킬 수 있는 기능을 갖기 위해서는 B/H=5 이상 되어야 한다. Fig. 10의 종축은 로다민 B가 사주 층을 통과한 후 각 시간에 대해 관측한 농도 C를 초기농도 Co로 무차원 한 값이며, 횡축은 일정지점(B/H=8)에서 오염물질이 사주 층의 폭을 통과하는데 걸리는 시간 t를 오염물질이 사주 층을 통과하여 농도가 정상상태로 되기까지 소요된 시간 to로 무차원 시킨 값이다. 또, H는 사주의 높이를 B는 사주의 폭이며, Fig. 9와 동일하게 H/B를 파라메타로 해서 시간에 대한 무차원 농도의 변화를 도시한 것이다. 실험은 투수층의 폭을 변화시키면서 오염물질을 대신하여 로다민 B로 사주 층을 통과시켰다.

Fig. 10에 의하면 일정수심에서 전반적으로 H/B에 관계없이 t/to에 따라서 지수적으로 감소하고, 무차원 시킨 농도 값은 H/B값에 따라서 다르게 분포하고 있지만 일정 지점에서 시간이 경과할 수 록 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서 하구에 형성된 사주 폭이 넓은 경우가 좁은 경우보다 수질정화 효과가 증가한 다는 것을 알 수가 있다. 즉, 사주 층 내부에서 로다민 B에 녹아있는 물질을 제거하기 위해 사주를 통과하는 데 필요한 t/to가 0.75보다 큰 값을 가져야 한다.

3.3 염수쐐기 침입의 방지효과 실험

Earth 댐이나 Rock Fill 댐은 댐을 축조할 때에 댐 제체의 중심에 차수벽(Core)을 설치하여 누수를 차단한다. 사용되는 흙의 투수계수는 k=3x10-6cm/sec인 점토를 이용하여 심벽을 만들고 있다. 해수와 접한 부분을 공사할 때는 Sheet pile를 타설하여 차수를 시키는 공법의 원리를 적용하고 있다. 본 실험은 이들의 원리를 이용하여 하구 사주층에 Block(TTP)을 설치하여 구조물의 염수쐐기 침입방지 효과를 응용하는 실험이다. 즉, 사주 층 내부에 일정형상의 블록을 설치하여 이들에 의해 염수쐐기의 침입방지효과를 확인하기 위해 기초적인 수리실험을 2차원 조파수조에서 실시하였다. 이 실험의 목적은 염수쐐기의 침입을 방지하기 위한 하구사주 층 내부에 설치하는 염수쐐기 침입을 방지하는 Block구조물을 개발하기 위한 기초실험이다. 파랑은 하구사주가 형성되는 조건을 가정하여 파고 5cm 주기 1초인 파형경사(Ho/Lo)가 0.032으로 국한 시켰다. Nayak(1970)는 내습파랑에 대한 파형경사(Ho/Lo) 와 $\rho_s g H_0/\gamma d_{50}$와의 관계를 정리하여 연안사주의 발생한계를 제안하였다.. 본 실험의 Ho/Lo의 값이 0.032는 Nayak가 제시한 입경에 대한 정상해빈 값으로 안정된 해안에 하구사주가 발생하는 값이다. 사주의 상부 폭을 20cm, 40cm로 하였으며, 사주 층의 전후 사면경사는 비교적 완만하게 1:4로 실험을 실시하였다. 파랑조건에서 사면의 세굴은 발생하지 않는 조건이다. 조파시간은 10분, 20분, 30분, 50분, 60분으로 하였다. 초기 농도가 정상상태로 되는 시간 to는 농도변화가 없는 시간으로 하였다. Fig. 10에서 별표가 있는 흰 원과 흰 사각형의 실험결과를 도시한 것이 사주층 내부에 TTP를 일렬로 설치하여 얻어진 실험값이다. 그 외의 것들은 TTP를 사주속에 설치하지 않는 실험결과를 도시한 것들이다. 별표가 있는 것이 염수의 침입을 방지하는 효과가 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 사주의 폭을 증가시키지 않아도 염수쐐기의 침입을 막을 수 있다는 것이다.

즉, 다시말해서 Fig. 10에서 별표가 있는 것이 없는 것 보다 동일 조건에서 염분의 농도를 감소시켜 염수쐐기를 차단시키는 효과가 크다는 것을 보여주고 있다. 별표가 있는 것은 동일한 B/H값에 사주속에 TTP를 일렬로 깔아서 실험한 값을 연결한 결과이다. 따라서 동일한 조건에서 별표가 있는 흰 사각형, 흰 원이 별표가 없는 검은 원, 검은 사각형과 비교했을 때

별표가 있는 것들이 별표가 없는 것보다 무차원 농도가 낮게 분포되어 있음을 알 수 있다. 이것들을 연결한 선이 검게 칠한 부분보다 아래에 점선으로 분포되어 있음을 알 수 있다. 이것은 사주속의 TTP가 염수쐐기의 침입을 차단하여 염분의 농도를 감소시키는 효과가 크게 있다는 것을 의미하는 것이다.

4. 결 론

(1) 하구에 형성된 사주 층 내부에 형성되는 염수와 담수의 경계층의 형상을 기존 이론과 실험으로 정리하였다.

(2) 사주 층을 통과하는 염분농도는 일정 장소에서 시간과 사주 폭이 증가함에 따라 감소된다. 사주 폭이 수질정화의 효과를 갖기 위해서는 적어도 B/H=5의 값이 필요하다.

(3) 사주 폭을 이용하여 염수쐐기의 방지효과를 극대화시키기 위해서는 동일조건에서 사주 층 내부에 염수쐐기 침입방지 구조물을 설치하면 큰 효과를 얻을 수 있다. 침입방지 구조물을 설치하면 B/H=4로서 설치하지 않을 경우인 B/H=16보다 큰 효과를 볼 수 있다.

(4) 하구에 형성되는 사주는 염수쐐기의 침입방지와 하천수의 수질 정화기능을 갖는 친환경 모래톱 구조물로서 준설을 할 경우 사전에 충분한 검토가 있어야 한다.

현재까지는 정상류에 대해 국한시킨 연구결과 이고 염수쐐기 실험과 파랑실험도 가장 간단한 상황을 재연시켜 연구의 실마리를 마련하였다. 금후, 비정상류에 대해 연구가 진행 중이며 다양한 파랑조건으로 염수쐐기차단 파랑실험을 실시하여 현장에서 적용할 수 있는 Block을 개발하기 위해서는 여러 가지 실험을 실시하여 문제점으로 남아 있는 과제를 풀어야 한다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

부산광역시 (2003). 동천하천환경개선을 위한 본 계획, pp 53-65.

환경부 (1999). 국내 여건에 맞는 자연형 하천 공법의 개발 Vol 1, pp 19-239.

Glover, R. E. (1959). "The Pattern of Fresh-Water Flow in a Coastal Aquifer", Jour. Geophysics Res., Vol 64, No 4, pp 457-459.

Henry, H.R. (1959). "Salt Intrusion into Fresh-Water Aquifers" Jour. Geophysics Res., Vol 64, No 11, pp 1911-1919.

Nayak, I.V. (1970) "Equilibrium Profile of Model Beaches", Proc. 12th. Conf. on Coastal Eng., pp 1321-1340.

Rumer, R.R. and Harleman, D.R.F. (1963). "Introduced Salt-Water Wedge in Porous Media", Proc. of A.S.C.E., Vol 89, No 6, pp 6.

Tamai, N. and Shima, S. (1967). "Salt Water Wedge in Unconfined Coastal Aquifers", Jounr. Cilvil Engr. of Japan, No 139, pp 15-18.

2007년 1월 19일 원고 접수
2007년 6월 8일 최종 수정본 채택