

경인운하 수로에서 해수유입에 의한 염분농도의 변화 Variation of Salt Concentration for the Intruded Sea Water in the Kyongin Navigation Channel

이 길 성* / 오 성 택** / 황 승 용**

Lee, Kil Seong / Oh, Seong-Taek / Hwang, Seung-Yong

Abstract

Sea water volume intruded from the lock gates was computed by a one-dimensional numerical model and the extent of diffusion of sea water was evaluated for that. The volume of intruded sea water, in the exchange processes of salt and fresh waters, was computed by the conceptual model considering the tidal level, volume of chamber, volume of canal, and operation period only. It was divided into some cases according to whether ships enter or leave the canal and whether the level of tide is lower or higher than that of water level in canal. The model, developed in this work, assumed that intruded sea water is well mixed in the canal; and complete is the exchange of waters between sea and canal. The simulation case was divided into two categories according to whether the water was added from the Han River or not.

Keywords : diffusion of sea water, numerical model, exchange process, canal, lock gate

요 지

갑문을 통하여 유입되는 해수의 양을 산정하고, 1차원 수치모형을 적용하여 운하 속으로 유입되는 해수의 확산 범위를 파악하였다. 복잡한 양상을 보이는 해수와 담수의 교환과정에서 조위, 갑실의 크기, 운하의 규모, 운영 시간 만을 고려한 개념적인 모형으로 표현하여 유입되는 해수의 양을 터미널로 배가 들어올 때와 나갈 때, 조위가 운하의 수위보다 높을 때와 낮을 때로 나누어 산정하였다. 본 연구에서 적용한 수치모형은 갑문을 통하여 유입되는 해수는 완전히 혼합된다고 가정하였으며, 또한 갑문을 열 때 갑실 속의 해수와 운하의 담수도 완전히 교환된다고 가정하였다. 서해 쪽 갑문을 통한 손실되는 물의 양을 한강 쪽의 갑문을 통하여 보충하는 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 고려하였다.

핵심용어 : 해수의 확산, 수치모형, 교환과정, 운하, 갑문

* 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정

1. 서 론

운하에는 배의 출입을 위하여 갑문을 설치하게 되고 그에 따라 갑문을 작동하게 되면 외해 쪽의 조위에 따라 해수가 들어오게 된다. 해수의 유입은 생태계의 변화를 야기할 수 있으며, 특히 주변에 경작지가 있을 때 경우에 따라 작물의 성장에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 그러므로, 갑문의 작동에 따라 유입되는 해수의 확산을 고려하는 등의 대비가 필요하다. 본 연구의 목적은 서해 갑문에서 갑문의 작동에 의하여 유입된 해수의 양과 농도를 산정하고, 유입된 해수의 확산에 의한 염분농도(salt concentration)의 변화를 계산하는 것이다.

해수의 유입에 의한 운하 내 염분농도의 변화를 살펴 보기 위해서는 먼저 유입되는 해수의 양과 농도를 결정하는 것이 요구된다. 유입되는 해수는 운하 속 염분농도를 결정하는 원천(source)이 되며 염분농도에 대한 확산 방정식(diffusion equation)의 풀이에서 부과되는 경계조건을 구성하게 된다.

갑문의 운영에 따른 해수의 유입과정이나 운하 속의 혼합과정은 물리적으로 복잡한 현상이다. 이러한 현상을 정확하게 모의하기 위해서는 시간에 따른 밀도의 변화를 고려한 3차원적인 해석방법이 요구되나 실제적인 문제의 해결을 위해서는 보다 단순화된 모형을 적용하는 것이 타당할 것이다. 따라서 본 연구에서는 유입되는 해수의 양과 농도를 산정함에 있어 조위, 갑실의 크기, 운하의 규모, 운영 시간만을 고려한 개념적인 모형으로 표

현하게 된다. 또한 경인운하 수로의 경우 터미널을 제외하고는 그 단면이 거의 일정하며 수심이 폭에 비해 비교적 얇고 작은 선박의 운항으로 횡단면에 대해 해수의 혼합이 완전히 이루어진다고 가정할 수 있으므로 수로 속 염분농도의 변화는 1차원 확산모형을 이용하게 된다.

2. 갑문을 통한 해수 유입

2.1 해수와 담수의 교환 과정

갑문을 작동할 때 운하 속에서 담수와 해수의 혼합이 이루어지는데, 여기에서 유입되는 해수가 운하 내 염분의 원천이 된다. 이러한 혼합의 과정은 조위, 갑실의 규모, 갑문의 종류, 터미널의 규모, 운영 시간, 운행하는 배의 출수, 중/배수의 방식, 해수와 담수의 상층된 정도 등에 따라 다른 양상을 보일 수 있다.

본 연구에서는 복잡한 양상을 보이는 해수와 담수의 교환과정을 조위, 갑실의 크기, 운하의 규모, 운영 시간만을 고려한 개념적인 모형으로 표현하여 유입되는 해수의 양을 산정하게 된다. 갑실에 물을 빼거나 채울 때 갑실 안의 물은 완전히 혼합된다고 가정한다. 이때 소금의 양은 갑실을 채울 때 쓰이는 물의 염분농도에 따라 달라질 수 있으며, 염분농도는 물 1m³에 담긴 염분(소금)의 양(kg)을 의미한다(Kerstma 등, 1994).

먼저, 해수의 유입에 초점을 맞추어 보면, 터미널로 배가 들어올 때와 나갈 때, 조위가 운하의 수위보다 높을 때와 낮을 때로 나누어 생각할 필요가 있다. Fig. 1

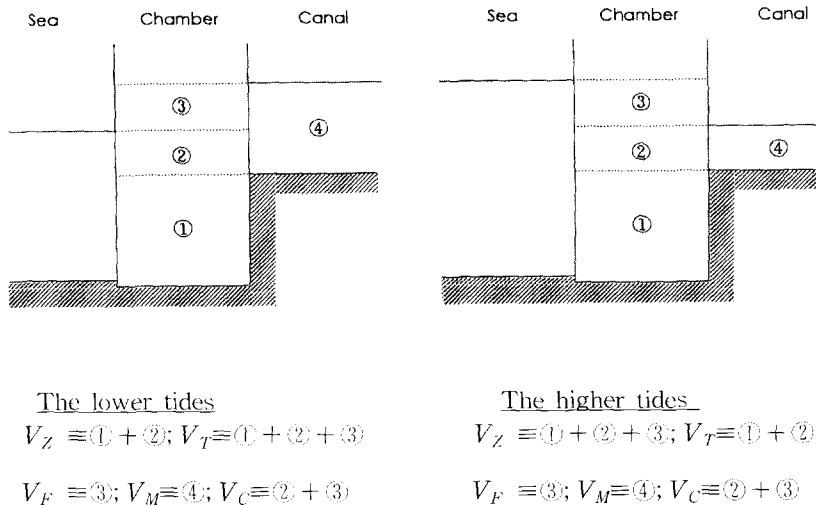


Fig. 1. Definition Sketch

에 이러한 산정에 관련되는 부피들을 정의하였다.

조위가 운하의 수위보다 낮은 경우를 먼저 살펴본다 (Fig. 2 참조). 처음에 갑실의 수위가 조위와 같다고 생각하고 해수의 평균 염분농도를 C_Z , 갑실의 평균 염분농도를 C_C , 운하의 평균 염분농도를 C_T 라 둔다. 갑문의 조작 시간은 36분이며, 배가 들고 나는 144분이 1회를 이루게 된다.

배가 들어오는 경우를 먼저 생각하면, 바다 쪽 갑문을 열 때 갑실 안의 염분농도 C_c' 은 갑실의 물과 해수의 교환 정도에 따라 달라지며 이러한 교환 정도를 나타내는 교환율, θ 를 생각하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_c' = \theta C_Z + (1 - \theta) C_C \quad (1)$$

열린 갑문을 닫고 물을 채울 때 배의 흡수에 해당하는 부피, V_S 를 고려하여 물을 채우기 전과 후의 소금의 양이 보존된다고 생각하면, 갑실 안의 염분농도 C_c'' 은 다음과 같다.

$$C_c'' = C_c' \frac{V_Z - V_S}{V_T - V_S} + C_T \frac{V_F}{V_T - V_S} \quad (2)$$

운하 쪽 갑문을 여는 경우, 갑실과 운하 사이의 물 교환을 생각하면 새로운 갑실의 염분농도 C_c''' 은 다음과 같으며, 이 때, 갑실에서 $(V_T - V_C)$ 만큼의 물은 교환되지 않는다고 가정한다.

$$C_c''' = C_c'' \frac{V_T - V_C}{V_T} + \theta C_T \frac{V_C}{V_T} + (1 - \theta) C_c'' \frac{V_C - V_S}{V_T} \quad (3)$$

또한 운하 안의 염분농도 C_T' 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_T' = C_T \frac{V_M - V_C}{V_M} + \theta C_c'' \frac{V_C - V_S}{V_M} + (1 - \theta) C_T \frac{V_C}{V_M} \quad (4)$$

물의 교환이 없을 때 각각의 염분농도는 전 단계의 값으로 남아있으며 배가 나가는 다음 단계에 쓰일 갑실 및 운하의 염분농도로 바꾸어 준다. 즉,

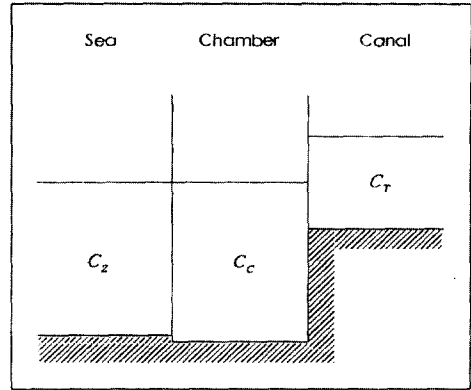


Fig. 2. Initial Stage of the Lower Tides

$$C_C = C_c''' \quad (5)$$

$$C_T = C_T' \quad (6)$$

배가 나가는 경우, 운하 쪽 갑문을 열 때 갑실과 운하 사이의 물 교환을 생각하면, 갑실의 염분농도 C_c' 은 다음과 같이 바뀐다.

$$C_c' = C_c \frac{V_T - V_C}{V_T - V_S} + \theta C_T \frac{V_C - V_S}{V_T - V_S} (1 - \theta) \frac{V_C}{V_T - V_S} \quad (7)$$

또한 운하 안의 염분농도 C_T' 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_T' = C_T \frac{V_M - (V_C - V_S)}{V_M} + \theta C_c \frac{V_C}{V_M} + (1 - \theta) C_T \frac{V_C - V_S}{V_M} \quad (8)$$

열린 갑문을 닫고 물을 뺄 때 갑실에서 염분농도의 변화는 없으므로

$$C_c'' = C_c' \quad (9)$$

와 같고 바다 쪽 갑문을 열 때 갑실 안의 물과 해수의 교환으로 인한 갑실의 염분농도 C_c''' 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_c''' = \theta C_Z + (1 - \theta) C_c'' \quad (10)$$

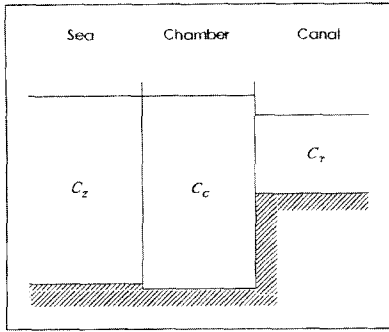


Fig. 3. Initial Stage of the Higher Tides

그리고 물의 교환이 없을 때 각각의 염분농도는 전 단계의 값으로 남아있으므로 식 (5)와 (6)과 같다.

조위가 운하의 수위보다 높은 경우는 앞의 낮은 경우와 거의 비슷하나 증/배수가 반대로 이루어진다는 점이 다르다(Fig. 3 참조).

배가 들어오는 경우, 바다 쪽 갑문을 열 때 갑실의 염분농도는 식 (1)과 같으며 열린 갑문을 닫고 물을 뺄 때 갑실에서 염분농도의 변화는 없으므로 식 (9)와 같다. 운하 쪽 갑문을 열 때와 물의 교환이 없을 때 갑실과 운하 안의 염분농도는 각각 식 (3)과 (4), 식 (5)와 (6)과 같다.

배가 나가는 경우, 운하 쪽 갑문을 열 때 갑실과 운하 안의 염분농도 각각 식 (7)과 (8)과 같으며, 열린 갑문을 닫고 물을 채울 때는 조위가 낮은 경우와 달리 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$C_c'' = C_c' \frac{V_T - V_S}{V_Z - V_S} + C_Z \frac{V_F}{V_Z - V_S} \quad (11)$$

바다 쪽 갑문을 열 때 갑실의 염분농도는 식(10)과 같으며, 물의 교환이 없을 때 갑실 및 운하의 염분농도는 각각 식 (5)와 (6)과 같다.

2.2 갑문을 통한 해수 유입량 산정

앞서 살펴본 해수와 담수의 교환에 의해 유입되는 해수의 양을 산정할 수 있다. 여기에서는 처음 1회 운영할 때 운하로 들어오는 해수의 양을 산정할 것이다. 처음 1회 운영이므로 운하와 갑실 속의 물은 담수라고 가정하고, 갑문이 열릴 때 해수와 담수의 교환은 완전히 이루어진다고 가정한다($\theta = 1$). 조위는 평균해수면(M.S.L.)으로 두며, 이 경우 조위는 운하의 수위보다 낮다. 관련되는 양들을 산정하면 Table 1과 같다.

앞서 유도한 식에서 해수와 담수의 교환이 완전한 경우 식 (1), (2), (4)를 식 (3)과 (6)에, 식 (7)과 (9)를 식 (8)과 (10)에 대입하여 정리하면, 배가 들어올 때와 나갈 때 갑실과 운하 안의 염분농도는 각각 식 (12)와 (13) 그리고 (14)와 (15)와 같다.

$$C_T' = C_Z \frac{V_Z - V_S}{V_T - V_S} \frac{V_C - V_S}{V_M} + C_T \left(1 - \frac{V_C}{V_M} + \frac{V_F}{V_T - V_S} \frac{V_C - V_S}{V_M} \right) \quad (12)$$

$$C_c''' = C_Z \frac{V_Z - V_S}{V_T - V_S} \frac{V_T - V_C}{V_T} + C_T \left(\frac{V_F}{V_T - V_S} \frac{V_T - V_C}{V_T} + \frac{V_C}{V_T} \right) \quad (13)$$

Table 1. Data Used for Estimating Sea Water Intruded

| Symbol | Quantity | Remark |
|----------------------------|--|-----------------------------|
| V_Z (m ³) | $225 \times 26 \times 11.876 \times 3 = 208423.8$ | Corresponding to M.S.L. |
| V_T (m ³) | $225 \times 26 \times 15.449 \times 3 = 271129.95$ | Corresponding to canal W.L. |
| V_F (m ³) | $225 \times 26 \times 3.573 \times 3 = 62706.15$ | |
| V_S (m ³) | $225 \times 26 \times 2.7 \times 3 = 47385.0$ | Assumed draft = 2.7 m |
| V_M (m ³) | 16585450 | Approximate value |
| V_C (m ³) | $225 \times 26 \times 7.0 \times 3 = 122850.0$ | |
| C_Z (kg/m ³) | 30 | Salt concentration at sea |
| θ | 1 | Complete mixing |

$$C_T' = C_C \frac{V_C}{V_M} \frac{V_T - V_C}{V_T - V_S} + C_T \left(1 - \frac{V_C - V_S}{V_M} + \frac{V_C}{V_M} \frac{V_C - V_S}{V_T - V_S} \right) \quad (14)$$

$$C_C''' = C_Z \quad (15)$$

Table 1에 보인 자료로 계산하면, 1회 운영에서 운하 속의 평균 염분농도는 0.09439 kg/m^3 이 된다. 이것을 염분농도 30 kg/m^3 의 해수로 환산하면, 약 $54,205 \text{ m}^3$ 의 해수가 유입된다고 말할 수 있다. 이와 같은 계산을 계속적으로 수행하면, 운영 회수에 따른 운하 속의 평균 염분농도를 산정할 수 있으나 이것은 운하 속에서 확산되는 현상을 고려하지 않은 결과이므로, 다소 과다 추정되는 양이라고 할 수 있다.

3. 갑문을 통한 유입해수의 확산

3.1 지배방정식 및 수치해법

갑문의 작동에 의해 유입된 해수는 운하 속의 물과 혼합된다. 이러한 혼합과정은 염분농도의 확산으로 생각할 수 있다. 따라서 지배방정식은 다음과 같은 1차원 확산방정식이다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (16)$$

여기에서 t 는 시간, x 는 공간좌표, C 는 평균 염분농도, D 는 확산계수이다.

이 식은 경계조건이 적절하게 주어지면 해석적으로 해석할 수도 있다. 그러나 갑문을 통하여 들어오는 해수의 양이 서해 쪽의 조위에 따라 변하고 배의 들고남에 따라 달라지는 등 복잡하게 구성되므로, 수치적으로 해석하는 것이 타당하다고 판단된다.

수치해석 방법은 유한차분법을 이용하였고, 시간에 대해 전방차분을, 공간에 대해 중앙차분을 적용하였다. 격자 간격은 각 단면에 대해 같은 부피를 갖는 격자를 만들기 위하여, 등분하지 않고 임의로 조절할 수 있는 가변격자를 사용하였다. 본 연구에서 이용한 시간 및 공간 격자의 간격은 각각 10 s, 50 m이다.

3.2 초기 및 경계조건

지배방정식이 적절한 해를 갖기 위해서는 적절한 초

기 및 경계조건이 부여되어야 한다. 본 모형의 초기조건으로는 운하 내에 한강에서 유입된 물의 염분농도, C_i 를 부과하였다. 경계조건은 서해 쪽 갑문에 대해 해수유입과정을 통하여 산정된 염분농도의 값을 사용하며, 한강 쪽 터미널에 대한 경계조건은 한강으로부터 물을 보충하지 않는 경우와 보충하는 경우, 두 가지로 나누어 고려한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

초기조건:

$$C(x, 0) = C_i \quad (0 \leq x \leq L) \quad (17)$$

여기서 L 은 운하 전체의 길이(= 16.8 km)이다.

경계조건:

- 서해 쪽 갑문에서

$$C(0, t) = C_0(t) \quad (18)$$

여기에서 $C_0(t)$ 는 매 시간 부과되는 서해 쪽의 경계에서 염분농도 값으로, 이미 유도한 식으로부터 구한 결과를 갑문이 열릴 때마다 적절한 경우에 맞추어 부과하였으며, 이것이 확산됨에 따라 매 시간 단계에 운하 속으로 유입된 소금 양의 보존을 고려하였다. 즉, 이것을 다시 쓰면

$$C_0(t) = \begin{cases} C_T & t = mT, \\ C_T - \Delta C & mT < t < (m+1)T \end{cases} \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (19)$$

이 되고, 여기에서 ΔC 는 직전 시간 단계에서 경계로부터 운하로 확산된 양(각 계산 점에서의 농도 변화량의 합)을 말하며, T 는 다음 갑문이 열리기까지 걸리는 시간(= 72 min)이다.

한강 쪽 터미널에서

물을 보충하지 않는 경우

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=L} = 0 \quad (20)$$

물을 보충하는 경우

$$C(L, t) =$$

$$\begin{cases} \frac{V_L C_L(t - \Delta t) + V_F C_i}{V_L + V_F} & t = mT, \quad m = 0, 1, 2, \dots \\ C_L(t) & mT < t < (m+1)T \end{cases} \quad (21)$$

여기에서 $C(L, t)$ 는 한강에서 보충하는 물의 염분농도를 고려한 경계 값이며, $C_L(t)$ 는 흐름률이 없다고 두었을 때의 경계조건(식 20)으로부터 얻은 값이고, V_L 은 경계에서 물의 부피이다.

4. 수치모형의 적용

4.1 경인운하

본 연구에서 해석하게 되는 경인운하는 계획 당시 총 연장 약 16.8 km이며, 폭은 구간에 따라 달라지지만 더미널 지역은 350 m, 수로 지역은 약 100 m이고 수심은 7.0 m로 일정하다. 해수가 유입되는 서해 쪽 갑문의 규모는 폭 26 m, 연장 225 m인 3개의 갑문으로 구성되어 있다. Fig. 4는 수치 모형을 적용할 때 쓰인 계산 영역의 분할을 나타낸다. 그림 아래 부분은 각 구간의 길이와 폭 그리고 격자 간격을 정리한 것이다.

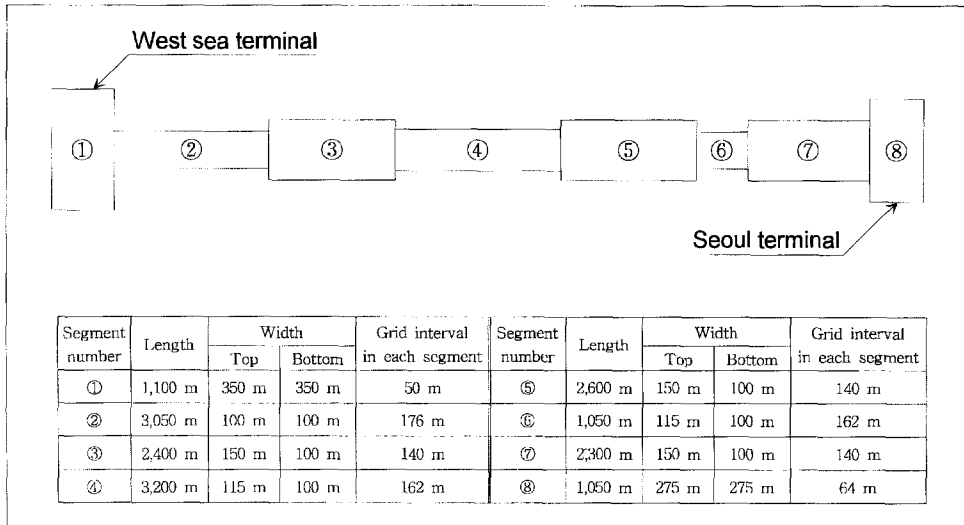


Fig. 4. Partition of Computational Domain

Table 2. Design Tidal Levels of the Kyonggi Canal

| Tidal constituent | Harmonic constants | Amplitude (cm) | Phase lag |
|------------------------------------|--------------------|----------------|-----------|
| M2 | | 295.0 | 131.7° |
| S2 | | 125.3 | 178.7° |
| K1 | | 37.9 | 298.7° |
| O1 | | 29.4 | 272.8° |
| Mean water level (above the datum) | | 487.7 cm | |

4.2 조위 산정

갑문을 통하여 운하 안으로 유입되는 해수의 양은 서해 쪽의 조위에 따라 결정된다. 본 연구에서 사용하는 조위는 한국수자원공사(1993)의 설계조위를 이용하였고, 분석기간이 단기간일 경우(1일)에는 평균해면을 사용하였으며, 장기간일 경우에는 Table 2에 나와있는 주태음반일주조(M2), 주태양반일주조(S2), 일월합성일주조(K1), 주태음일주조(O1)를 합성하여 조위(H)를 산정하였다.

4.3 확산계수

확산계수는 갑문을 통하여 운하 내로 유입된 해수에 의한 염분농도 분포를 결정하는 가장 중요한 매개변수

Table 3. Diffusion Coefficients for Lake Ocean and Canal

| Reference | Diffusion Coefficient, D | Region |
|------------------------------|----------------------------|-------------|
| Okubo and Osmidov (1970) | 19.97 m ² /s | lake, ocean |
| Okubo (1971) | 14.42 m ² /s | ocean |
| Thomas (1958) | 3.0 m ² /s | canal |
| Schuster (1965) | 0.76 m ² /s | canal |
| Godfrey and Frederick (1970) | 9.6 m ² /s | canal |
| Kerstma et al. (1994) | 20 - 500 m ² /s | canal |

이다. 그러나 확산계수의 값은 해당 지역의 흐름과 지형의 특성뿐만 아니라 확산되는 용질의 특성에 따라 매우 다르게 나타나므로 이 값을 이론적으로 정확하게 산정한다는 것은 어려운 일이다. 따라서 현장실측이나 실험을 통하여 산정하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 본 연구의 경우 아직 건설되지 않은 운하를 대상으로 하므로 실측된 자료가 없으며, 여건에 비추어 실험을 하는 것도 많은 문제점이 있어 기존의 외국 운하에서 사용한 값과 흐름이 거의 없는 호수나 해양에서의 값을 참고하여 사용하기로 한다.

Table 3은 외국에서 운하나 호수/해양에서 쓰고 있는 확산계수를 몇몇 문헌(Bowie 등, 1985; Fischer 등, 1979; Kerstma 등, 1993)에서 발췌 정리한 것이다. 이 중에서 Okubo와 Osmidov(1970), Okubo(1971)의 값은 호수나 대양에서 사용한 값이며, Thomas(1958), Schuster(1965), Godfrey와 Frederick(1970)의 값은 선박이 거의 다니지 않는 수로에서 측정된 값이다. Kerstma 등(1993)이 제시한 값은 네덜란드의 운하에 적용한 것으로 경인운하와 유사한 경우라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 확산계수의 값을 Kerstma 등(1993)에서 제시한 범위와 Okubo와 Osmidov(1970), Okubo(1971)가 제시한 값을 고려하여 20 m²/s를 기준으로 분석하기로 한다.

4.4 초기 염분농도

본 연구에서 구상한 수치모형의 초기조건으로는 한강 하류의 신곡수중보 상류지역에 있는 한강 쪽 갑문을 통

하여 유입되는 물의 염분농도로 가정하는 것이 타당할 것으로 판단하였다. 신곡수중보 상류지역의 경우, 한강관리사업소(1993)에서 1993년 3월, 6월, 10월에 염소 이온의 농도를 측정하여 보고한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 그것의 평균값(32.5 mg/l)을 염분농도로 환산하여 생각하면 0.06 kg/m³가 된다.

4.5 손실 수량

서해 쪽 갑문을 통하여 배가 출입할 때 조위의 변동에 의해 운하의 수위와 차이가 생기므로, 이러한 수위차를 없애기 위해 갑실에 물을 더하거나 빼게 된다. 조위가 운하의 수위보다 높고 배가 들어올 때, 갑실에 보충하는 물은 운하의 물을 쓰는 것이 해수 유입의 차단이라는 측면에서 유리하다.

그러나 이것은 운하의 물을 서해 쪽으로 방류하는 결과를 가져오며, 이렇게 손실되는 물의 양을 2.1절에서 설명한 과정을 써서 계산하면 1회 운영에서 평균조위(EL. 0.427 m)일 때 약 62,700 m³이며 이것을 환산하면 7.3 cms가 되며 이는 운하의 수위를 3 cm 가량 낮추는 결과를 낳게 된다. 따라서 수위를 유지시키기 위해서는 한강 쪽의 갑문을 통하여 물을 보충하여야 할 것으로 판단된다. 이때의 수량은 최소한 손실수량과 같아야 하며, 수로 바닥이나 제방을 통하여 손실되는 물의 양까지 고려하여야 할 것이다.

4.6 흡수와 교환율

해수와 담수가 교환될 때 흡수에 의하여 염분농도 분포에 많은 영향이 있는 것으로 보고되어 있다(Kerstma 등, 1993). 그러나 본 연구에서는 운하 속의 표고와 갑실 속의 표고 차(Fig. 1)에 의해 갑실 속의 염분농도를 평균하여 사용하였기 때문에 흡수에 의한 영향이 크지 않을 것으로 판단되며, 흡수를 고려하는 경우와 않는 경우에 대해 계산을 수행해 본 결과 그 차이가 미미하였으므로 이후 계산에서 흡수는 고려하지 않았다.

해수와 담수의 교환율 θ 는 약 0.6~0.9 정도이다(Kerstma 등, 1993). Fig. 5는 교환율이 0.6, 0.8, 1.0일 때 갑문 2회 운영(출 1회, 입 1회), 1일 운영, 1개월 운영으로 나누어 나타낸 것이다. 이 때의 확산계수는 20 m²/s이고 조위는 평균조위로 하였다. 여기서 알 수 있는 것은 교환율에 의하여 운하 내의 염분농도 분포에 다소 차이가 있으나, 시간이 경과할수록 운하 전체의 염분농도 분포에 비해 그 차이는 미미

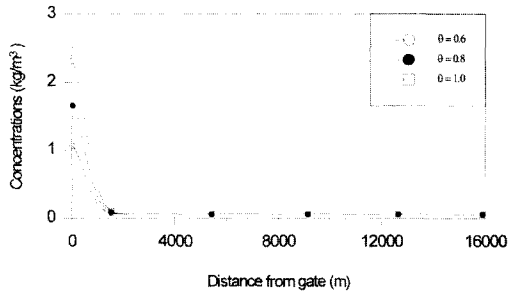


Fig. 5(a). Salt concentration Distributions with/without Exchange Rate(1 cycle)

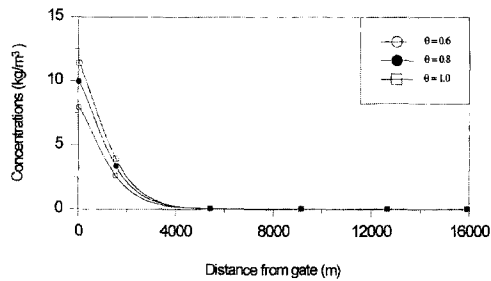


Fig. 5(b). Salt concentration Distributions with/without Exchange Rate(1 day)

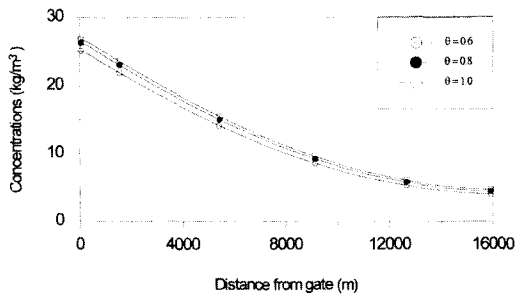


Fig. 5(c). Salt concentration Distributions with/without Exchange Rate(1 month)

하다는 것이다. 본 연구에서는 갑문의 개방시간이 총 13분 정도로서 갑실 속의 해수가 완전히 유입되기에 비교적 충분한 시간일 뿐더러, 안전성에 중점을 두어 교환율을 1.0으로 두고 계산하였다. 그러나 이것은 이론적으로 가능한 값이며, 실제에서는 이 보다 작은 값으로 알려져 있다(Kerstma 등, 1993).

4.7 적용

4.7.1 적용 조건

본 연구에서 적용한 수치모형은 갑문을 통하여 유입되는 해수는 완전히 혼합된다고 가정하였으며, 또한 갑문을 열 때 갑실 속의 해수와 운하의 담수도 완전히 교환된다고 가정하였다. 갑문은 1일 20회 운영(출 10회, 입 10회) 된다고 두었으며, 운영할 때 3개의 갑문은 동시에 작동하고 선박의 출/입은 교대로 이루어지는 것으로 하였다. 해수의 염분농도는 30 kg/m^3 으로 두었다.

서해 쪽 갑문을 통해 손실되는 물의 양을 한강 쪽의 갑문을 통하여 보충하는 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 생각하였다. 두 경우 모두 운하의 수위는 일정하게 유지하면서 서해 쪽 갑문을 통하여 유입되는 해수와 한강 쪽 터미널을 통해 보충되는 물의 염분농도만을 고려하여 모의하였다. 이것을 몇 가지 확산계수와 조합하여 모의하는 경우를 정리하면 Table 4와 같다.

계속적인 갑문의 운영은 운하의 염분농도를 높여게 된다. 용도에 따른 물의 염분농도 기준을 살펴보면, 농업 용수의 경우 1.35 kg/m^3 이하, 농업 용수의 경우 작물에 따라 다르나 관개용수의 경우 대략 $0.27 \sim 5.42 \text{ kg/m}^3$ 의 범위를 두고 있다(Heitmann, 1990). 따라서 본 연구에서는 5 kg/m^3 를 한계 염분농도의 기준으로 선정하였다.

4.7.2 적용 결과

Table 4에서 구분한 8가지 경우에 대하여 수치 계산의 결과를 갑문으로부터 거리에 따른 몇 지점의 염분농도와 갑문 장기 운영(360일)으로 나누어 나타내면 다음과 같다.

Table 4. Simulation Cases (Case 1 - 8)

| Case | $D \text{ (m}^2/\text{s)}$ | Water recharge |
|------|----------------------------|----------------|
| 1 | 20 | × |
| 2 | 20 | ○ |
| 3 | 30 | × |
| 4 | 30 | ○ |
| 5 | 40 | × |
| 6 | 40 | ○ |
| 7 | 50 | × |
| 8 | 50 | ○ |

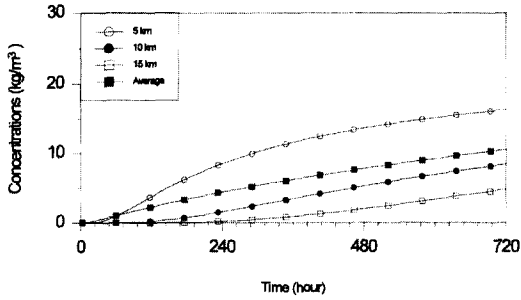


Fig. 6(a) Variation of Salt Concentration at Some Points (Case 1)

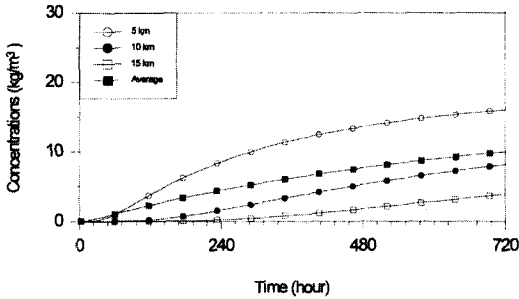


Fig. 6(b) Variation of Salt Concentration at Some Points (Case 2)

- 지점별 염분농도

Fig. 6은 8가지 경우에 대하여 30일 동안 모의한 결과를 서해 쪽 갑문에서 5 km, 10 km, 15 km, 그리고 서해 쪽 터미널을 제외한 수로내의 평균 염분농도로 나타낸 것이다.

수로내의 평균 염분농도는 Case 1과 2의 경우 약 11일 정도 지나면 5 kg/m^3 을 초과한다. Table 5는 각 Case별로 5 kg/m^3 을 초과하는데 소요되는 시간을 나타낸 것이다. 표에서 보이듯이 5 km까지는 보충수의 영향이 거의 없지만, 10 km에서는 보충수의 영향으로 염분농도가 기준이상으로 확산되는데 확산계수

Table 5. Time Elapsed to Reach Concentration at Some Points (Case 1-8)

(Unit: hour)

| Case | Distance | 5 km | 10 km | 15 km | Average |
|------|----------|------|-------|-------|---------|
| 1 | | 146 | 458 | - | 276 |
| 2 | | 147 | 463 | - | 277 |
| 3 | | 113 | 337 | 521 | 214 |
| 4 | | 115 | 340 | 590 | 216 |
| 5 | | 98 | 275 | 414 | 183 |
| 6 | | 98 | 278 | 455 | 184 |
| 7 | | 87 | 237 | 350 | 165 |
| 8 | | 88 | 239 | 379 | 165 |

에 따라 2 ~ 5 hr가 더 걸린다. 15 km의 경우에는 29 ~ 69 hr가 더 걸리는 것으로 나타났다. 표에서 반칸은 30일 내에는 기준 염분농도에 도달하지 않았음을 의미한다.

- 장기 운영

Fig. 7은 360일 동안 갑문을 운영한 결과이다. 보충수를 고려하지 않은 경우(Case 1, 3, 5, 7)와 고려한 경우(Case 2, 4, 6, 8), 장기 운영에서 염분농도 확산에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 보충수를 고려하지 않은 경우 360일이 지나면 운하 전체에서 확산계수와 무관하게 염분농도가 거의 30 kg/m^3 에 근접한다. 보충수를 고려한 경우 확산계수에 따라 약간의 차이를 보이나 서해 쪽 경계에서는 약 25 kg/m^3 정도, 한강 쪽의 경계에서 10 kg/m^3 정도이다.

Fig. 7(a)와 (b)에서 보이듯이 확산계수가 $20 \text{ m}^2/\text{s}$ 에서 보충수를 고려하지 않은 경우 300일이 지나면 수렴하여 거의 고정된 거동을 보이나, 보충수를 고려한 경우 120일이면 수렴하게 됨을 알 수 있다.

각 Case에 대한 수렴기간과 그 때의 평균 염분농도를 Table 6에 정리하였다. 표에서 보이듯이 보충수를 고려하지 않은 경우, 확산계수에 따라 수렴하는데

Table 6. Elapsed Time and Average Concentration for Each Case (Case 1-8)

| Case | Time(day) | Salinity (kg/m^3) | Case | Time(day) | Salinity (kg/m^3) |
|------|-----------|------------------------------|------|-----------|------------------------------|
| 1 | 290 | 29.34 | 5 | 200 | 29.68 |
| 2 | 110 | 16.50 | 6 | 80 | 17.12 |
| 3 | 230 | 29.56 | 7 | 180 | 29.75 |
| 4 | 80 | 16.75 | 8 | 70 | 17.14 |

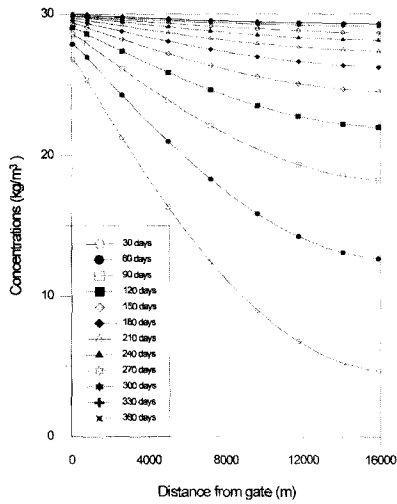


Fig. 7(a) Salt Concentration Distributions in 360 Days (Case 1)

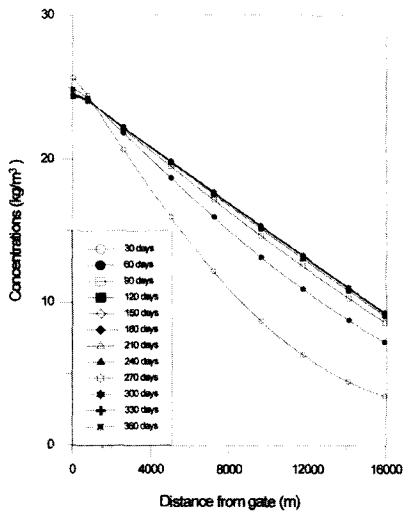


Fig. 7(b) Salt Concentration Distributions in 360 Days (Case 2)

걸리는 기간은 180~290일 정도로 차이를 보이지만 그때의 평균 염분농도는 거의 같다. 보충수를 고려한 경우, 확산계수에 따라 수렴하는데 걸리는 기간은 70~110일 정도이며 그때의 평균 염분농도는 보충수를 고려하지 않은 경우의 약 57% 정도이다.

앞의 경우와 달리 운하 내의 수위를 EL 2.7 m(즉,

수심 5.7 m)로 두고, 한강 쪽으로 7 cms의 유입이 있고 서해 쪽으로 같은 양이 유출되며 그 외 조건은 앞서 기술한 Case 2, 4, 6, 8과 동일하게 두어 계산을 수행해 보았다. 이 경우 수로내의 평균 염분농도는 약 18일 정도 지나면 5 kg/m^3 을 초과하며, 장기 운영인 경우 서해 쪽 경계에서는 약 15 kg/m^3 , 한강 쪽의 경계에서 6 kg/m^3 정도로 한강 쪽에서의 유입을 고려하지 않은 경우에 비하여 약 37% 정도 염분농도가 낮아진다. 일정한 값으로 수렴하는 걸리는 기간은 70~130일 정도이다.

5. 결론

경인운하의 건설에 따라 유입되는 해수의 양과 농도를 산정하였으며, 운하내의 염분농도의 변화를 1차원 수치모형을 사용하여 해석하였다. 해수의 교환과정은 조위, 갑실의 크기, 운하의 규모, 운영 시간을 고려한 개념적인 모형으로 구성하였으며 이를 1차원 확산모형의 경계조건으로 부과하였다.

해석 결과, 출입하는 배의 출수에 의한 영향은 크지 않으며, 교환율에 의하여 운하 내의 염분농도 분포에 다소 차이가 있으나 시간이 경과할수록 운하 전체의 염분농도 분포에 비해 그 차이는 미미한 것으로 나타났다. 운영기간이 약 11일 이상이면 서해쪽 터미널을 제외한 수로 전체의 평균 염분농도가 5 kg/m^3 을 초과한다. 장기 운영인 경우 보충수를 고려할 때 서해 쪽 경계에서는 약 25 kg/m^3 정도, 한강 쪽의 경계에서 약 10 kg/m^3 정도이며, 일정한 값으로 수렴하는 걸리는 기간은 70~110일 정도이다.

감사의 글

본 연구는 경인운하 시설사업 기본계획 및 기본설계의 일환으로 1995년 12월부터 1996년 5월까지 수행되었으며, 연구의 수행을 위해 재정적인 지원을 해주신 (주)한국종합기술개발공사에 감사드립니다.

참고 문헌

- 한강관리사업소 (1993). 한강하류 수질보전 대책수립 조사 보고서. 서울특별시.
- 한국수자원공사 (1993). 경인운하 보완조사 보고서. 건설부.
- Bowie, G. L., Mills, W. B., Porcella, D. B., Campbell, C. L., Pagenkopf, J. R., Rupp, G.

- L., Johnson, K. M., Chan, P. W. H., and Gherini, S. A. (1985). *Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling*. 2nd Ed., EPA/600/3-85/040. Env. Res. Lab., Athens, Georgia.
- Fischer, H. B., Imberger, J., List, E. J., Koh, R. C. Y., and Brooks, N. H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, London.
- Godfrey, R.G. and Fredrick, B.J. (1970). Streams dispersion at selected sites. U.S. Geological Survey Professional Papers 433-K.
- Heitmann, H.-G., ed. (1990). *Saline water processing-desalination and treatment of seawater, brackish water, and industrial waste water*. VCH Publishers, New York.
- Kerstma, J., Kolkman, P. A., Regeling, H. J., and Venis, W. A. (1994). *Water quality control at ship locks - prevention of salt and fresh water exchange*. Balkema, Rotterdam.
- Okubo, A. (1971). "Oceanic diffusion diagrams." *Deep Sea Research*, August.
- Okubo, A. and Osmidov, R.V. (1970). "Empirical dependence of the coefficient of horizontal turbulent diffusion in the ocean on the scale of the phenomenon in question." *Atmospheric and Oceanic Physics*, Vol. 6, No. 5.
- Schuster, J.C. (1965). "Canal discharge measurements with radioisotopes." *J. Hydraul. Div., ASCE*, Vol. 91, pp. 101-124.
- Thomas, I.E. (1958). *Dispersion in open-channel flow*. Ph.D. thesis, Northwestern Univ.

<최종본 접수일 : 1998년 3월 12일>