

## 항만의 해수교환 능력의 평가 지표

이정렬\* · 김인호\*\*

\*성균관대학교 토목환경공학과

\*\*동해대학교 건설시스템공학과

## Evaluation Index of Sea Water Exchange Capability of a Port

JUNG LYUL LEE\* AND IN HO KIM\*\*

\*Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

\*\*Department of Civil Engineering, Donghae University, Donghae, Korea

**KEY WORDS:** Sea Water Exchange 해수교환, Mathematical Model 수학적 모형, Port Characteristic Length 항만길이, Advection 이송, Diffusion 확산

**ABSTRACT:** A mathematical model has been developed to evaluate the capability of sea water exchanges under tidal and diffusive environments and has been verified through comparison with numerical experiments. From the mathematical analysis, this study presents the rates of sea water exchanges due to the tidal inflow and diffusion process. The port characteristic length  $L_p$  is the most significant evaluation index.

### 1. 서 론

최근 항내 수질의 악화로 월과의 허용(오병철 등, 2002), 다양한 형태의 유통구의 설치(Lee and Han, 2001), 해수교환 방파제(이달수, 2001), 그리고 부방파제(이광준, 2000; 김도삼과 윤희면, 2004; 조원철과 이진원, 2003) 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 그 기능의 복잡성 때문에 아직 이러한 부대 시설의 설치로 항의 자정 능력 또는 해수 교환 능력이 어느 정도 향상되는지 기술적으로 파악하는 데는 어려움이 있었다. 그러나 잘 알려진 바와 같이 호수나 만과 같이 지속적으로 오염물질이 부하되는 경우, 자정계수(assimilation factor)와 같은 지표가 자정능력을 파악하는 중요한 지표로서 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 항만의 평가 지표로서 적절한 해수 교환 능력을 항의 형태 및 체적, 평균 수심, 해수유통면적, 해수 유입량 등 해수교환에 영향을 미치는 인자를 반영하면서 쉽게 항만의 해수 교환 능력을 판단할 수 있는 평가 지표에 대한 연구를 수행한다.

항내외의 해수를 서로 교환시키는 외력에는 조류와 같은 흐름과 난류로 인한 확산이 있다. 본 연구에서는 이러한 해양환경 하에서 항 내부에서 부하되는 오염물질이 조류로 인하여 항외로 배출되고 난류로 인하여 외해와 섞이는 확산 과정을 모식화한 간단한 수학적 모형을 수립하고 수치 실험과 비교하여 수학적 모형의 지배 계수들을 결정한다. 이 계수들을 분석하여 해수교환 능력을 지배하는 대표적인 지표를 제시한다. 본 실험을 위하여 사용된 해수의 흐름자료는 해수유동모형의 결과로부터 얻는다.

본 연구의 목적은 방파제 건설로 인하여 항내 해수가 고립되어 수질이 악화될 가능성이 많으므로 사업 후 항내 해수교환 능력을 평가하기 위한 수학적 모형을 수립하고 계수를 결정하며 이를 통하여 항만 정화능력을 평가하는데 있다.

### 2. 수학적 모형

항만 내에 오염물질이 부하되었을 경우 해수가 교환됨에 따라 오염물질이 배출된다. 따라서 보존성 오염물질의 단위시간당 농도 변화로부터 해수 교환을  $E$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E = - \frac{\Delta \bar{C}}{C} \quad (1)$$

여기서,  $\bar{C}$ 는 항내 오염물질의 평균 농도이고  $\Delta \bar{C}$ 는 항내 오염물질의 단위시간당 농도 변화이다.  $E$ 가 단위시간당 해수교환율이라는 점을 감안하고 식 (1)을  $\Delta t$ 로 나누고 정리하면 다음 식과 같이 된다.

$$\frac{\Delta \bar{C}}{\Delta t} = - E \bar{C} \quad (2)$$

항만 내에 보존성 오염물질이 초기에 전 항내에 골고루 부하되었을 경우 외해와의 해수교환에 따른 시간에 따른 질량 변화는 질량보존법칙에 의하여 항구를 통한 유입, 유출, 확산 항으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\Delta V \bar{C}}{\Delta t} = Q_{in} C_{in} - Q_{out} C_{out} - D'(\bar{C} - C_s) \quad (3)$$

제1저자 이정렬 연락처 : 경기도 수원시 장안구 천천동 300

031-290-7531 jilee@skku.edu

여기서  $V$ 는 항의 해수체적,  $Q_{in}$ 은 유입 조량,  $Q_{out}$ 은 유출 조량,  $C_{in}$ 은 유입 조량의 농도,  $D$ 은 용적 확산계수이다.  $C_s$ 는 외해의 농도로 0으로 간주한다. 해수유통구가 있다면 그로 인한 유입, 유출, 확산도 고려해야 한다.

만약 오염물질이 항내에서 완전 혼합조건이 적용된다면 유출 농도  $C_{out}$ 를 항내 평균 농도  $\bar{C}$ 로 둘 수 있으며  $C_{in}$ 을  $\alpha \bar{C}$ 로 둔다면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\Delta V \bar{C}}{\Delta t} = -(Q_{out} - \alpha Q_{in} + D) \bar{C} \quad (4)$$

식 (4)에서 좌변 항을 분리하고 정리하면 아래와 같다.

$$V \frac{\Delta \bar{C}}{\Delta t} = - \bar{C} \left[ \frac{\Delta V}{\Delta t} + Q_{out} - \alpha Q_{in} + D \right] \quad (5)$$

항내 해수의 보존성으로부터 식 (5)의 우변 항의 첫 번째와 두 번째 항은 다음과 같이 유입 유량으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\Delta \bar{C}}{\Delta t} = - \bar{C} \frac{(1-\alpha)Q_{in} + D}{V} \quad (6)$$

따라서 식 (2)와 비교하여 해수교환율은 아래와 같다.

$$E = \frac{\beta Q_{in} + D}{V} \quad (7)$$

여기서  $\beta$ 는  $1-\alpha$ 로서 전체 유입량에 대한 깨끗한 해수의 유입 비율이다. 그리고 이송 항에 의한 교환율의 역수  $V/\beta Q_{in}$ 은 오염된 항이 청정해수로 바뀌는 데 걸리는 시간으로 이후  $\tau$ 로 둔다.

항구가 하나라면 밀물 시 해수가 항내로 유입될 경우 오염물질이 이송에 의하여 배출되지 못하므로 오염물질의 농도는 깨끗한 해수의 유입 양만큼 감소한다. 썰물 시는 오염물질의 일부가 항 밖으로 빠져나가지만 항내 평균 농도에는 변화를 미치지 못한다. 따라서 항구가 하나인 경우 썰물 시의 해수교환은 없고 밀물 시 깨끗한 해수가 유입된 만큼 해수교환이 이루어진다고 볼 수 있다. 따라서 이송 과정에 의한 조석의 한주기 평균 해수교환율  $E_Q$ 는 다음과 같이 tidal prism  $P$ 로 근사적으로 표현될 수 있다.

$$E_Q = \frac{\beta P}{VT} = \frac{\beta R}{hT} \quad (8)$$

여기서  $\beta < 1$ 이고  $T$ 는 조석 주기,  $R$ 은 항내 평균 조위차이다. 따라서 day의 단위로 표현하면  $E_Q \approx 2\beta R/\bar{h}d$ 가 된다. 만약 항구가 양쪽으로 열려있어 밀물과 썰물시 해수가 항을 통하여 유통되는 경우 항내로 유입되는 유량은 항구가 하나인 경우보다 많게 되므로 해수교환율은 식 (8)의 결과보다 크게 되지만 이론적으로 추정하기는 쉽지 않다.

확산과정에 의한 해수교환율을 살펴본다. 용적 확산계수  $D$ 은 Fick's First Law에 의하여 다음과 같다.

$$D = \frac{DA_c}{\Delta x} \quad (9)$$

여기서,  $D$ 는 확산계수이며  $A_c$ 는 항구 등을 통한 해수유통 면적,  $\Delta x$ 는 항의 중심으로부터 오염물질의 농도가 0이 되는 항구까지의 거리보다 다소 큰 값을 갖는다. 따라서 확산 과정에 의한 해수교환율은 다음과 같다.

$$E_D = \frac{D}{V} = \frac{Dbh}{A_s \bar{h} \Delta x} \quad (10)$$

여기서  $b$ 는 항구의 폭이며  $h$ 는 항구에서의 평균 수심,  $A_s$ 는 항의 수면적이다. 만약  $h$ 와  $\bar{h}$ 가 같고 항의 길이가  $L$ 이고 폭이  $B$ 라면

$$E_D \approx \frac{2Db}{L^2 B} = \frac{2D}{L_b^2} \quad (11)$$

여기서  $L_b$ 는 항만 길이로서 아래와 같이 정의하며 항만의 정화능력을 평가하는 지표로 사용될 수 있다.

$$L_b = \sqrt{\frac{L^2 B}{b}} \quad (12)$$

만약  $B$ 와  $b$ 가 같다면  $L_b = L$ 이 되므로 항만길이는 항의 길이와 같게 된다. 따라서 위 식과 같이 정의된 항만 길이는 폭이  $b$ 이고 항의 길이가  $L_b$ 인 항으로 취급될 수 있다. 다양한 형태의 실제 항에 대해서는 여러 여건을 고려한 수치모형실험을 통하여 항만길이가 결정될 수 있다. 만약 동일한 크기의 항구가 양쪽으로 열린 경우는 항의 중심선에서의 경계조건(확산조건인 경우)으로 보아 두 개의 항이 등을 대고 있는 형상으로 간주될 수 있으므로 항의 길이를 전체 항 길이의 1/2로 취급할 수 있다. 확산계수는 인위적으로 조정하기 어려울 뿐만 아니라 해양환경에 대하여 비슷한 값을 가질 수 있다. 따라서 가능한 한  $L_b$ 를 작게 항을 계획하거나  $L_b$ 가 줄어들도록 해수유통구를 늘린다면 직접적으로 수질을 향상시키는 성과를 거둘 수 있다.

이상의 수학적 모형의 분석으로부터 항만에 순간적으로 부하되는 오염물질의 배출능력(해수교환능력)은 교체시간  $\tau$ 와  $L_b$ 가 작을수록 유리하다. 계속 유입되는 오염물질에 대해서는 자정능력이 평가 지표가 되는 데 그 경우 교환능력의 지표에 항내 해수의 체적을 곱한 경우에 해당되므로 항내로 유입되는 깨끗한 해수량,  $\beta Q_{in}$ 과 용적 확산계수,  $DV/L_b^2$ 이 클수록 유리해진다.

### 3. 이상조건에 대한 비교

제2장에서 언급된 해수교환율에 대한 수학적 모델을 이상적인 조건에서 수치모형의 결과와 비교하여 검증한다. 이상적인 조건에서의 실험은 수학적 모형의 검증은 물론 적용되는 수치모

형의 신뢰성을 검토하기 위한 것이기도 하다. 이상 조건에서 수심은 동일하며 항의 형상은 Fig. 1에 도시된 바와 같이 직사각형이며 평균수심에 대한 항내 조차의 비 1/15에 대하여 수치실험이 수행되었다.

본 이론의 실용성을 키우기 위하여 대부분의 항의 규모와 유사한 수면적이 적용되었다. 그리고 항구가 하나인 경우와 양쪽이 열린 2가지 경우에 대하여 수행되었다. 필요한 수치 모형은 부록 A에 상세히 언급된 천수방정식을 이용하는 해수유동 모형과 부록 B에 언급된 이송 및 확산 방정식을 이용하는 수질 모형 (Lee, 1998)이다. 특히 사용되는 수질 모형은 수치확산이 없어 이송에 의한 이론해의 검토에 유용하다. 확산계수는  $x, y$  양 방향에 대하여 동일한 값이 사용되었다.

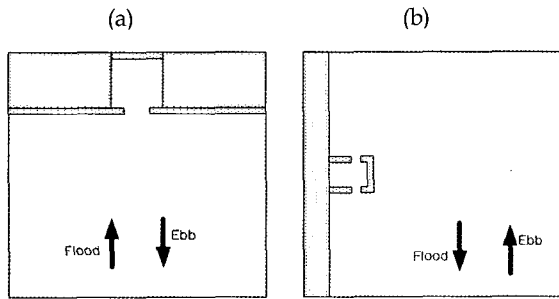


Fig. 1 Geometry sketch of ideal cases

3.1 항구가 하나인 경우

직사각형의 항내 전역에 오염물질을 초기 농도  $C_0$ 로 일정하게 부하한 경우 이론 해는 아래와 같다.

$$\frac{\Delta \bar{C}}{\Delta t} = - \left( \frac{\beta R}{hT} + \frac{2D}{L_p^2} \right) \bar{C}$$

$$\Rightarrow \bar{C} = C_0 \exp \left( - \left[ \frac{\beta R}{hT} + \frac{2D}{L_p^2} \right] t \right) \quad (13)$$

직사각형의 항내 전역에 오염물질을 일정하게 부하하고 조석 운동 없이 확산 계수를  $5m^2/sec$ 로 두고 수치계산한 항만의 해수교환을 결과가 Fig. 2에 도시되었다.

그림 상에서의 해수교환율은 다음과 같이 초기 해수에 대한 교환율을 의미한다.

$$E_o = 1 - \frac{\bar{C}}{C_0} \quad (14)$$

수치계산상의  $\bar{C}$ 는 초기 오염 물질이 부하된 항내 격자에서의 농도를 평균하여 구한다. Fig. 2의 이론적인 해는 식 (13)에서  $R=0, D=5m^2/sec$ 로 두고 계산한 결과이다. 따라서 오직 확산으로 인한 해수 교환 정도를 나타내고 있다. 결과가 유사한 것으로 미루어 이론적 모형에서 사용된 식 (11)의 가정이 타당한 결과를 제공하고 있다. 마찬가지로 이송 및 확산 모두 반영

한 결과가 각각 Fig. 3에 도시되었다. 항구가 하나인 경우  $D=5m^2/sec$ 의 경우에 이송의 영향은 아주 작아  $\beta$ 값은 0.1보다도 작은 것으로 판단된다. 만약 확산계수가 0이라면 동일 오염물질이 유출·유입되므로  $\beta$ 값은 0이 된다. 수치모형의 검토 결과도 해수교환율이 0으로 제공되어 수치 확산이 발생되지 않는다는 것을 확인하였다. 따라서  $\beta$ 값은 확산계수가 클수록 큰 값이 적용될 수 있으며 항의 규모보다 큰 확산계수를 한다면 1에 가까운 값이 적용될 수 있다. 월파로 해수가 유입되는 경우는 항으로부터 배출된 해수가 재유입되는 경우에 해당된다고 볼 수 없으므로 그 유입량에 대한  $\beta$ 값은 1로 취급될 수 있다. 오염물질은 평균수위에서 조위가 상승하는 시점에 부하되었다. 유입되는 유량의 평균치는  $166m^3/sec$ 로 식 (8)의 결과와 비교하여 거의 차이가 없다.

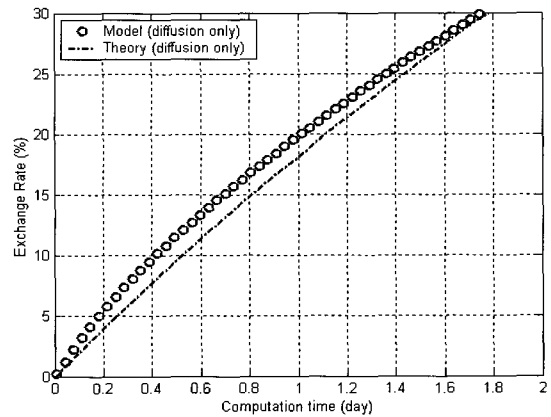


Fig. 2 Comparison between theoretical and numerical results for the case of diffusion only

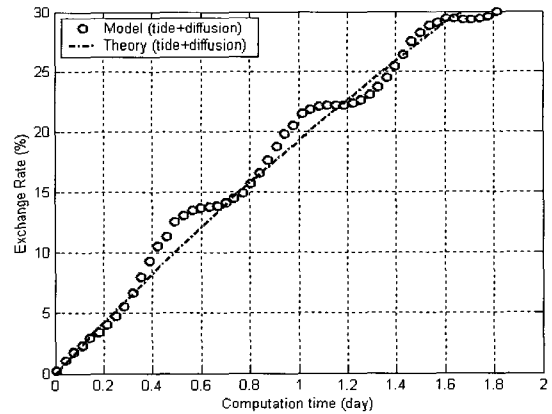


Fig. 3 Comparison between theoretical and numerical results for the combined case of tide+diffusion ( $\beta=0.1$ )

3.2 항구가 양쪽에 있는 경우

Fig. 1b와 같이 양쪽이 열린 경우에 대한 해는 다음과 같다.

$$\bar{C} = C_0 \exp \left( - \left[ \frac{\beta \bar{Q}_{in}}{A_s h} + \frac{2D}{L_p^2} \right] t \right) \quad (15)$$

조석운동 없이 확산계수를  $5m^2/sec$ 로 두고 직사각형의 항내 전역에 오염물질을 일정하게 부하하고 수치계산한 항만의 해수교환을 결과가 Fig. 4에 도시되었다.

이론적인 해는 식 (15)에서 이송항을 무시하고  $D$ 를  $5m^2/sec$ 로 두고 계산한 결과이다.  $900m \times 1200m$  항에  $300m$ 씩 양쪽이 열린 항에 대하여 항만길이  $L_b = 1,460m$ 일 때 최적의 결과를 낳았다. 이송 및 확산 모두 반영한 결과가 각각 Fig. 5에 도시되었다.

한쪽이 열린 전형적인 항만에 비하여 양쪽으로는 해수유통이 원활하여 해수 교환 능력이 유입 유량의 평균치에 비례하여 크게 평가되었다. 그러나 이송의 영향은 여전히 작게 평가되어  $\beta$  값은 0.05 정도인 것으로 판단된다. 항구가 하나일 경우보다  $\beta$  값이 작은 이유는 항구가 서로 마주보고 있어서 배출 농도가 평균 농도보다 작게 이루어지기 때문으로 판단된다. 오염물질은 썰물 시점에 부하되었으며 적용된 조석 조건에 대하여 유입 평균 유량은  $406m^3/sec$ 로 산정되었다.

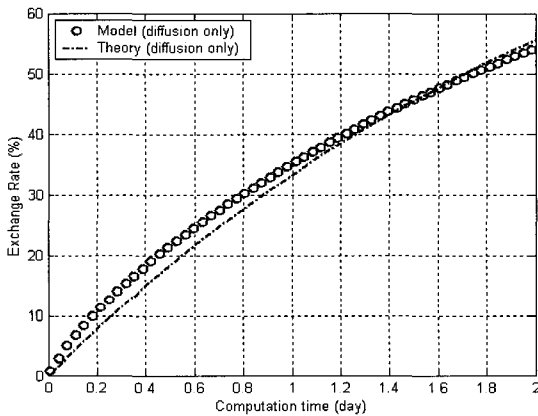


Fig. 4 Comparison between theoretical and numerical results for the case of diffusion only

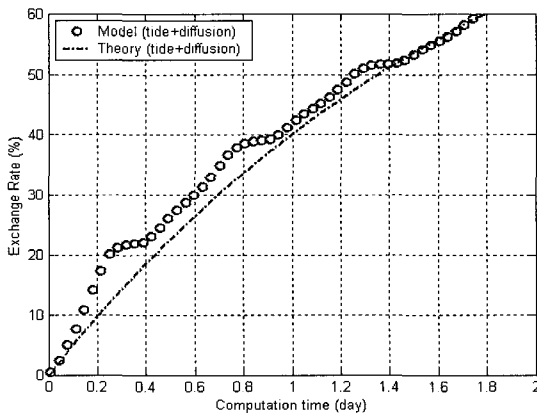


Fig. 5 Comparison between theoretical and numerical results for the combined case of tide+diffusion ( $\beta=0.05$ )

#### 4. 울산 신항만에의 적용

수학적 모형의 실제 지형에의 적용성을 파악하기 위하여 Fig. 6과 같이 울산 신항만 예정지에 적용한다.

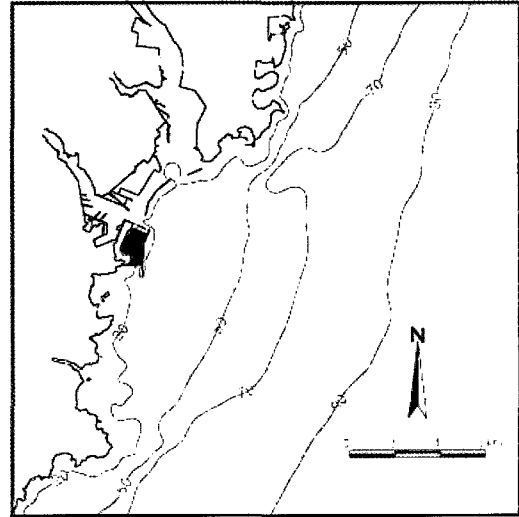


Fig. 6 Location of study area and loading zone of contaminants

Fig. 6에 도시된 바와 같이 항의 남측 및 북측 일부가 열려 있어 이송에 의한 해수 교환은 물론 확산에 의한 해수교환도 비교적 크게 발생할 수 있다. 이송 및 확산의 기여 정도를 보기 위하여 먼저 분리하여 실험한 후 합쳐서의 효과도 살펴본다.

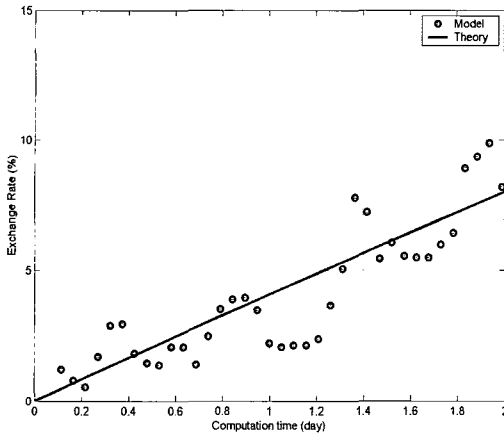
##### 4.1 확산이 없는 경우

확산계수를 0으로 두고 창조 시점에서 항내 전역에 오염물질을 일정하게 부하하고 수치 계산한 신항만의 해수교환을 결과가 Fig. 7a에 도시되었다. 따라서 오직 조류의 왕래로 인한 해수교환 정도를 나타내고 있다. 항구 한쪽만 열린 전형적인 항만에 비하여 양쪽으로는 해수 유통이 원활하여 해수 교환 능력이 비교적 우수하게 평가된다. 그러나 조류로 인한 해수교환율은 일반적으로 작기 때문에 분석 결과 해수교환율은 약  $0.04day^{-1}$ 이었다.

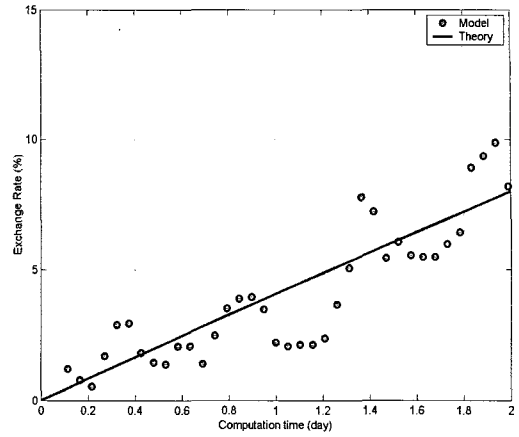
##### 4.2 확산만 있는 경우

조석운동 없이 확산계수만을 두어 수치계산한 해수교환을 결과가 Fig. 7b에 도시되었다.

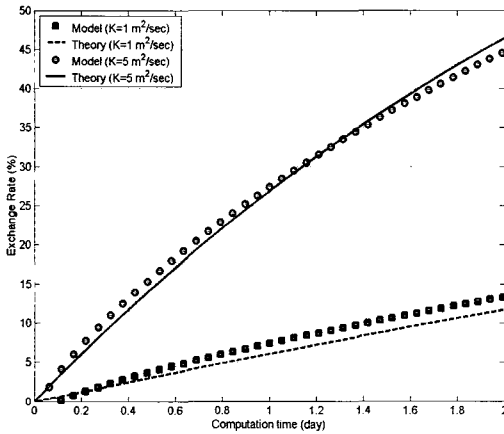
확산계수가  $1m^2/sec$ 인 경우에도 항 입구를 통한 해수 교환 능력은 조류 등 이송만에 의한 것보다 다소 크게 평가된다. 확산계수가  $1m^2/sec$ 인 경우 해수교환율은 약  $0.0625day^{-1}$  정도이고 확산계수가  $5m^2/sec$ 인 경우는 이보다 5배 커서 약  $0.33day^{-1}$ 이다. 즉 오염물질이 항내로 부하되어도 95% 정도가 9일이면 배출될 수 있다.



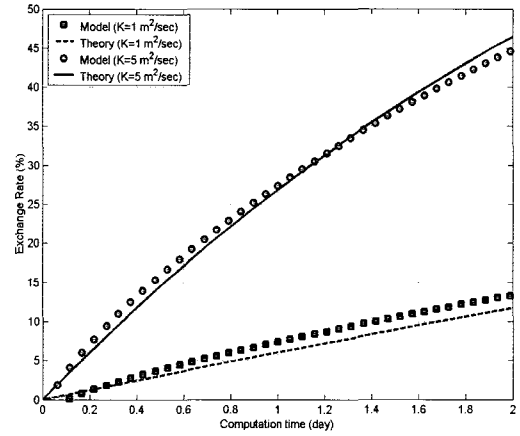
(a) Case of tide only



(a) Case of tide only



(b) Case of diffusion only



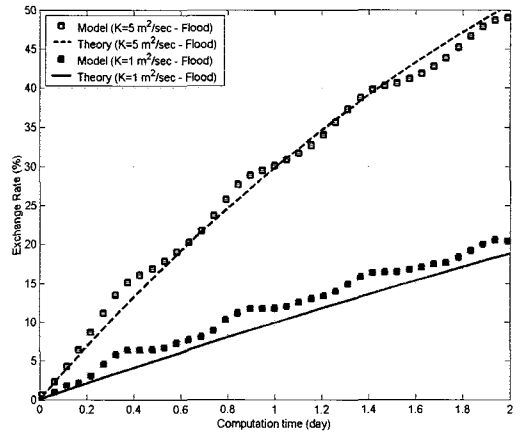
(b) Case of diffusion only

Fig. 7 Effect of advection and diffusion processes on sea water exchange

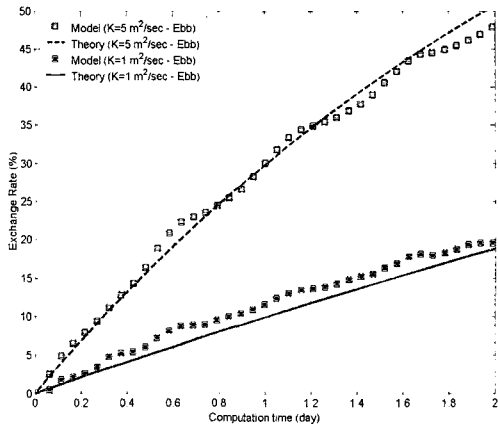
Fig. 7 Effect of advection and diffusion processes on sea water exchange

4.3 조류 및 확산 모두를 반영한 경우

조석운동과 확산거동을 모두 반영하여 수치 계산한 해수교환을 결과가 Fig. 8에 도시되었다. 창조시 부하했을 경우와 낙조시 부하했을 경우의 영향을 살펴보기 위하여 두 경우에 대하여 각각 비교하였다. 전체적으로 부하 시점이 해수교환율에 미치는 영향은 미미하였다. 조류 운동이 있는 경우 확산계수가  $1m^2/sec$  인 경우 해수교환율은 약  $0.1day^{-1}$  정도이고 확산계수가  $5m^2/sec$  인 경우는  $0.36day^{-1}$  정도로 계산되었다. Fig. 9와 Fig. 10은 창조시점에 오염물질 부하 후 각각 1일, 2일 후의 농도 분포를 초기치에 대한 백분율로 도시한 것이다.



(a) For loading at the start of flood tide



(b) For loading at the start of ebb tide

Fig. 8 Comparison between theoretical and numerical results for the case of tide+diffusion.

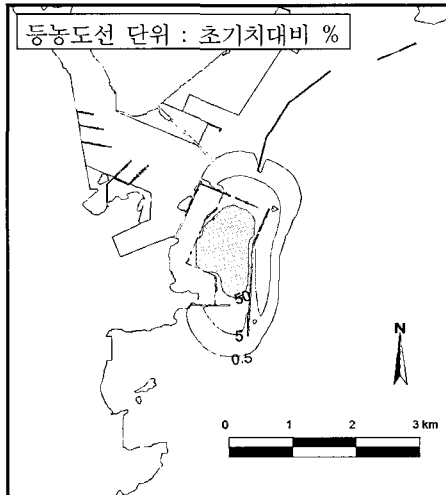


Fig. 9 Contours of normalized concentration (after 1 day,  $D = 5m^2/sec$ )

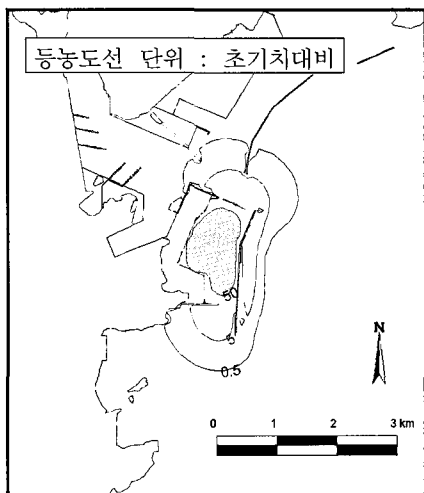


Fig.10 Contours of normalized concentration (after 2days,  $D = 5m^2/sec$ )

## 5. 결 론

항의자정능력 또는 해수교환 능력의 평가지표로서 교체시간과 항만길이를 제시한다. 교체시간은 항 내 해수의 체적에 대한 깨끗한 해수 유입량으로 정의되며 항구를 통한 조량의 유·출입보다는 해수교환 방파제나 해수유통구 등의 설치로 향상시킬 수 있다. 그리고 항만 길이는 항의 형태, 수역 면적, 항내 평균 수심, 항구의 폭, 해수유통면적 등이 갖는 확산에 의한 해수교환 능력의 평가지표로 활용될 수 있다. 일반적으로 조류, 풍성류, 해빈류 등에 의한 오염물질의 배출은 배출된 해수를 다시 유입시킬 가능성이 많으므로 이송에 의한 해수교환율보다는 확산거동에 의한 해수교환이 더 크게 평가된다.

따라서 우리나라에 이미 건설된 항 그리고 앞으로 건설될 항마다 우선 교체시간  $\tau$ 와 항만길이  $L_p$ 를 각각 조사하여 제시하면 항의 효율적인 수질 관리를 위한 지표로서 유용하게 활용될 수 있다고 사료된다. 물론 지속적으로 유입되는 오염물질에 대한 관리차원에서 항만의 체적을 제시하는 것이 바람직하다고 본다.

## 참 고 문 헌

김도삼, 윤희면 (2004). "말뚝 계류된 부방파제의 공간파랑제어 및 동적거동에 관한 연구", 한국해양해양공학회지, 제14권, 제3호, pp 183-191.

오병철, 전인식, 정태성, 이달수 (2002). "파랑에너지를 이용한 항 내 해수순환증진에 대한 연구", 한국해양해양공학회지, 제 14권, 제3호, pp 209-221.

이광준 (2000). "수면에 거치된 수직방파제가 항내 정온도에 미치는 영향 분석", 석사학위논문, 성균관대학교.

이달수 (2001). "해수교환방파제의 실용화 연구", 해양정책 R&D 동향, 제2호, pp 13-17.

조원철, 이진원 (2003). "부유식 방파제와 잠재를 이용한 파랑 차단 성능 연구", 한국해양해양공학회지, 제15권, 제4호, pp 224-231.

Lee, J.L. (1998). "A High-Accuracy Approach for Modeling Flow-Dominated Transport", In C.A. Brebbia ed., Environmental Coastal Regions, Proc. 2nd Int. Conf. on Envir. Coastal Region, Cancun, pp 277-286.

Lee, J.L. and Han, S.W. (2001). "An Experimental Study on Circulating Flow Around a Submerged Horizontal Plate", J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol 13, No 2, pp 109-121.

## Appendix A : 해수순환 수치모형

### A.1. 지배방정식

수심 적분된 비선형 천수방정식이 조석 및 조류를 예측하기 위한 수치모형의 지배방정식으로 사용되었다.

**A.1.1. 연속방정식**

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0$$

**A.1.2. 운동량 보존 방정식**

○ x 방향

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{Q_x^2}{h+\eta} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{Q_x Q_y}{h+\eta} \right] \\ & - fQ_y + g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_{Bx}}{\rho} \\ = & \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial Q_x}{\partial y} \end{aligned}$$

○ y 방향

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{Q_y^2}{h+\eta} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{Q_x Q_y}{h+\eta} \right] \\ & - fQ_x + g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_{By}}{\rho} \\ = & \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial Q_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial Q_y}{\partial y} \end{aligned}$$

여기서,

- $x, y$  : 2차원 직교좌표
  - $t$  : 시간
  - $\eta$  : 정수면상에서 평균해수면까지의 높이 (수면변위)
  - $h$  : 정수면으로부터 해저면까지의 거리(수심)
  - $f$  : 코리올리 계수
  - $\rho$  : 해수밀도
  - $g$  : 중력 가속도
  - $D_x, D_y$  : 난류확산계수
  - $\tau_B (\tau_{Bx}, \tau_{By})$  : 해저면 마찰응력
  - $Q_x, Q_y$  : 수심 적분된 유량벡터
- $$\left( Q_x = \int_{-h}^{\eta} u dz, \quad Q_y = \int_{-h}^{\eta} v dz \right)$$

**A.2. 수치해석**

천수방정식은 수평대류, 확산, 전파와 같은 유체흐름의 복합적인 물리현상이 매순간 각각의 독립적인 과정의 합으로 설명될 수 있다는 인식에 근거하여 fractional step method를 사용하여 해석하였다. 수평대류과정은 수치적으로 정확하고 안정적인 Eulerian-Lagrangian Method, 확산과정은 ADI(Alternative Directional Implicit) 유한 차분법을 사용하였다. 전파과정은

수평대류 및 확산과정을 거쳐 그 효과를 반영하고, 교호격자 체계(staggered grid system)하에서 육지경계에서는 유속벡터를 경계면에 두고 개방경계에서는 시간에 따른 조위변화를 입력하는 수위를 경계에 두어 ADI 유한 차분법으로 수치해석을 수행하였다.

**Appendix B : 오염물질 이동 모형**

**B.1. 지배방정식**

해수교환 산정을 위한 수치모형의 지배방정식은 다음과 같이 수심 평균된 오염물질의 이송 및 확산방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left( h D_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left( h D_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right)$$

여기서,

- $\bar{C}$  : 오염물질의 평균 농도
- $u, v$  : x와 y방향의 유속
- $h$  : 수심
- $D_x, D_y$  : x와 y방향의 확산계수

**B.2. 수치해석**

본 연구를 위하여 사용된 이송 및 확산방정식의 수치해석은 fractional step method에 의하여 이송과 확산과정을 각각의 독립과정으로 가정한다. 이송단계에서 사용하는 기법인 전방추적법은 기존의 방법과는 달리 내삽 과정이 필요없는 방법이므로 이송이 우월한 흐름 내지는 확산계수가 적은 영역에서도 수치확산이 없는 정확한 모의를 할 수 있다. 확산단계 수치해석법은 해수순환모형의 확산단계 수치해석법과 동일하게 ADI (Alternating Direction Implicit) 방법을 사용하였다. 이송 과정의 정확한 모의를 위하여 오염 입자가 매 시간 간폭마다의 위치를 라그랑주적으로 이동하고 오일러적인 확산단계 수치해석법을 위하여 위치하고 있는 격자의 중심으로 잠시 이동하고 확산과정에 의해 새로 할당된 제 값을 갖고 제 위치로 다시 되돌려지는 방법을 취한다. 만약 오염입자가 하나도 없는 격자에 확산 과정으로 새로운 값이 할당되면 격자 중심에서 새로운 오염입자를 생성한다.

2004년 10월 18일 원고 접수

2004년 11월 24일 최종 수정본 채택