

항내수질 개선을 위한 친환경 외곽시설에 관한 연구

김강민* · 강석형** · 유하상*** · 김상훈****

*,**,***,**** (주)세일종합기술공사, 항만 및 해안개발 기술연구소

A Study on Environmentally Friend Counter Facilities for Improvement of Harbor Water Quality

Kang-Min Kim* · Suk-Hyong Kang** · Ha-Sang Ryu*** · Sang-Hoon Kim****

*,**,***,**** Seil Engineering Co., Ltd., Port and Coastal Development Institute

요 약 : 파랑에너지를 차단하고 항내 정온을 확보하기 위해 설치된 외곽시설인 방파제는 불투과성이기 때문에 항만을 폐쇄성으로 만들 수 있으며, 항내·외간의 해수교환은 급격히 감소될 수 있다. 항만개발의 최근 추세는 항내의 수질 보호와 친수성이 강조되어, 기존의 불투과성 방파제의 일부에 투과성으로 설계한 제체투과성 해수교환방파제를 설치하는 것으로 나타났다. 이 경우 외해의 에너지가 항내로 전달되어 항내 오염물질의 희석률 증대와 함께 외해로 배출되도록 하고 있다. 오염이 심화된 항만(남해 동부해안에 위치한 삼천포 구항)에서 항내 수질을 개선하기 위한 방안은 육상오염원을 제거하는 것이 최선이나, 폐쇄성이 큰 항만의 경우, 외해와의 해수순환을 강화시켜야만 한다. 즉, 기존의 항만에서의 항내 수질개선을 위해서 외곽시설의 일부에 해수소통구를 두는 방법이 가장 최선이라 할 수 있다. 본 연구에서는 항내 오염이 심각한 항만을 대상으로 하여, 해수소통구를 통한 해수순환 양상을 수치계산을 통해 검토하고 수반되는 해수교환율을 검토하였다. 본 연구에서는 유한차분법으로 수치모형을 구성하였으며, 해수소통구 도입에 따른 항내의 해수순환 및 해수교환율을 평가하였다.

핵심용어 : 방파제, 해수교환, 수질, 해수소통구, 유한차분법, 수치모형

Abstract : Due to the impermeability of outer wall facilities such as Breakwaters which dissipates the wave energy and keeps harbor tranquility, the enclosed area of harbor becomes partially blocked and the water exchange can be reduced. Recent trends of port development protect water quality and emphasize Water-Front, so the method which enhances the circulation of harbor waters and the dilution of the water pollutants are studied. The best improvement of water quality is a remove of pollutant source on land, but an enclosed port must be enhanced the tidal exchange. For this end, the best improvement may be made a drain-route on the existing outer wall facilities. In this study, the numerical computations were carried out to predict the circulation of harbor waters and the tidal exchange through the drain-route in the polluted harbor(Samchonpo-guhang) located at the east coast of South Sea. Computational models adopting FDM(Finite Difference Method) were used here and were already verified from the previous studies and ocean survey. As a result of this study, circulation and the tidal exchange at the harbor before and after introduction of drain-route were assessed.

Key words : Breakwaters, Water exchange, Water quality, Drain-route, FDM, Computational model

1. 서 론

항만내의 해수교환을 원활하게 유지하는 것은 매우 중요한 사항이나 현실적으로 어려움이 많은 실정이다. 외해 파랑으로부터 항만시설을 보호하기 위하여 방파제를 건설하면 해수의 교환율과 파랑의 작용으로 공기 중의 산소가 항내의 해수 중으로 흡수되는 비율이 방파제 건설 전보다 훨씬 감소하여 항내의 해수는 만성적인 산소 부족현상이 발생할 수 있다. 이러한 변화는 결국 생태계에 악영향을 미침으로써 연안의 생산성을 저하시킬 뿐 아니라 수질을 악화시키고 심한 악취를 발생시키므로 국민의 보건위생에도 해를 끼치는 요소로 작용하고 있어 신항만건설촉

진법은 해양 친수공간의 건설 및 운영을 신항만건설사업 내용의 하나로 규정하고 있는 실정이다(한국해양연구원, 2001).

본 연구에서는 현재 항내오염으로 문제가 되고 있는 삼천포 구항을 대상으로 하여, 해수교환을 높이기 위해 동방파제에 해수소통구를 설치할 경우의 실험안을 설정하여, 해수유동 모델링과 오염확산 모델링을 수행한 후, 항내 해수순환 양상과 항내 COD농도 잔류량과 희석률에 의한 해수교환율(최초의 항내 평균 COD농도와 비교하여 감소된 COD농도의 비율)을 산정하였다. 모델링은 모델의 수립, 검증, 예측실험의 순서로 수행되었으며, 사용된 수치모형은 유한차분법에 근거한 2차원 연직적분 모형이다.

* 참신회원, kikami@seileng.com 02)831-4832

** dolphin@seileng.com 02)836-0230

*** coolman@seileng.com 02)831-4832

**** ksh9507@seileng.com 02)831-4832

2. 수치모델의 구성

2.1 지배방정식

1) 해수유동 모델링 지배방정식

장파근사에 기준을 둔 평면 2차원 유체의 지배방정식은 다음과 같다. 단, 압력항은 정수압만을 고려하는 것으로 하였다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[M] + \frac{\partial}{\partial y}[N] = a \quad (1)$$

- x, y방향의 운동방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial UM}{\partial x} + \frac{\partial VM}{\partial y} - fN = \\ & -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial M}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial M}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & - \frac{\gamma_b^2}{(h+\zeta)^2} M \sqrt{M^2 + N^2} \\ & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial UN}{\partial x} + \frac{\partial VN}{\partial y} + fM = \\ & -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial N}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial N}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$- \frac{\gamma_b^2}{(h+\zeta)^2} N \sqrt{M^2 + N^2}$$

여기서, U, V : x, y 방향의 단면 평균 유속

$$U = \frac{1}{\zeta+h} \int_{-h}^{\zeta} u dz, \quad V = \frac{1}{\zeta+h} \int_{-h}^{\zeta} v dz$$

M, N : x, y 방향의 선유량 (m²/sec)

$$M = (\zeta+h)U, \quad N = (\zeta+h)V$$

ζ : 조위

h : 평균수심

g : 중력가속도

ν_t : 와동점성계수

γ_b^2 : 해저마찰계수

$$\gamma_b^2 = \frac{g}{C^2} \quad (C : \text{Chezy 계수})$$

f : 코리올리 계수

a : 유입 부하량

2) 오염확산 모델링 지배방정식

미국 수자원 연구소 Hayaman & Brandes(1971)에 의해 개발된 물질의 이류·확산을 산정하는 2차원 연직적분 모형인 STTM모형을 근간으로 하며, 2차원 수평흐름내의 이류·확산 방정식으로 수립하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x}(E_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(E_y \frac{\partial C}{\partial y}) \\ & - u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} + S_i + S_o \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, C 는 보존량의 농도, u, v 는 연직평균된 x, y방향의 순간속도로서 해수유동모형에 의하여 산정된 시간별 변동값을 적용하였고, S_i, S_o 는 sink와 source항이다. E_x, E_y 는 각 방향의 확산계수로서 다음과 같다(Harleman, 1964).

$$\begin{aligned} E_x &= 8.72 n u |h|^{5/6} \\ E_y &= 8.72 n v |h|^{5/6} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, n 는 조도계수이며 u, v 는 각 방향별 유속, h 는 총수심이다.

2.2 모형의 수립

1) 차분화

해수유동계산은 평면 2차원 단층모형을 ADI(Alternation Direction Implicit)법에 의해 계산한다. ADI법은 타원형 편미분방정식의 경계치문제의 차분근사해법에서 나타나는 대형의 연립일차방정식을 풀이하는 방법으로 x방향으로 지배방정식을 계산하는 경우에는 x축 방향의 성분을 음적(implicit)으로 표시하고, y축방향의 성분은 양적(explicit)으로 차분근사하여 x방향의 미지량을 갱신하고, y방향의 경우에는 반대로 하여 갱신하는 것으로 이 계산수법의 특징은 x, y방향의 변수가 각각 교대로 한쪽 방향만 음적인 차분식으로 표현되므로 계산식이 간단하며, x, y방향에서 음과 양적인 차분표현을 교대로 반복함으로써 오차의 증대가 상쇄되어 계산이 안정하다는 것이다.

위에서 기술한 바와 같이 각 지배방정식을 차분근사한다. 이때 이류항의 차분기법은 Donor Cell scheme을, 점성항의 2계 미분항에는 중앙차분을, 공간에 대해서는 엇갈림격자계를 이용하여 차분근사식으로 나타내면 다음식과 같이 된다.

- 연속방정식

$$\frac{\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^n}{\Delta t/2} + \frac{M_{i+1,j}^{n+1/2} - M_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} + \frac{N_{i,j+1}^n - N_{i,j}^n}{\Delta y} = 0 \quad (8)$$

- x 방향운동방정식

$$\begin{aligned} & \frac{M_{i,j}^{n+1/2} - M_{i,j}^n}{\Delta t/2} + \frac{1}{\Delta x} (F_x_{i,j}^n - F_x_{i-1,j}^n) + \frac{1}{\Delta y} (F_y_{i,j}^n - F_y_{i,j-1}^n) \\ & - f \frac{N_{i,j}^n + N_{i,j+1}^n}{2} = -g H x_{i,j}^n \frac{1}{\Delta x} (\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i-1,j}^n) \\ & + D M_{i,j}^n - \frac{\gamma_b^2}{(H X_{i,j}^n)^2} M_{i,j}^n \sqrt{(M_{i,j}^n)^2 + (N_{i,j}^n)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

- y 방향운동방정식

$$\begin{aligned} & \frac{N_{i,j}^{n+1/2} - N_{i,j}^n}{\Delta t/2} + \frac{1}{\Delta x} (F F_x_{i,j}^n - F F_x_{i-1,j}^n) + \frac{1}{\Delta y} (F F_y_{i,j}^n - F F_y_{i,j-1}^n) \\ & + f \frac{M_{i,j}^{n+1/2} + M_{i+1,j}^{n+1/2}}{2} = -g H y_{i,j}^n \frac{1}{\Delta y} (\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j-1}^n) \\ & + D N_{i,j}^n - \frac{\gamma_b^2}{(H Y_{i,j}^n)^2} N_{i,j}^{n+1/2} \sqrt{(M_{i,j}^{n+1/2})^2 + (N_{i,j}^n)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, DM, DN : x, y향의 점성항

F_x, FF_x : x방향의 flux

F_y, yFF : y방향의 flux

$$HX_{i,j} = \frac{1}{2}(h_{i,j} + h_{i-1,j} + \zeta_{i,j} + \zeta_{i-1,j})$$

$$HY_{i,j} = \frac{1}{2}(h_{i,j} + h_{i,j-1} + \zeta_{i,j} + \zeta_{i,j-1})$$

$$\bar{M} = \frac{1}{4}(M_{i+1,j} + M_{i+1,j-1} + M_{i,j} + M_{i,j-1})$$

$$\bar{N} = \frac{1}{4}(N_{i,j} + N_{i,j+1} + N_{i-1,j} + N_{i-1,j+1})$$

오염확산 계산은 앞절에서 언급한 위식을 음해법에 의해 값을 구하였으며, 차분식은 다음과 같다. x방향의 계산결과를 이용하여, 치환자를 상수로 하여 y방향의 농도값을 점차적으로 계산하게 된다.

$$V_{i,j} \frac{C_{i,j}^{k+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} = Tx_{i,j}(C_{i+1,j} - C_{i,j}) - Tx_{i-1,j}(C_{i,j} - C_{i-1,j}) + Ty_{i,j}(C_{i,j+1} - C_{i,j}) - Ty_{i,j-1}(C_{i,j} - C_{i,j-1}) + ux_{i-1,j}C_{i-1,j} - ux_{i,j}C_{i,j} + uy_{i,j-1}C_{i,j-1} - uy_{i,j}C_{i,j} \quad (11)$$

여기서, $\Delta s = \Delta x = \Delta y$

$$Tx_{i,j} = \frac{1}{2}(h_{i+1,j} + h_{i,j})Ex_{i,j}$$

$$Ty_{i,j} = \frac{1}{2}(h_{i,j+1} + h_{i,j})Ey_{i,j}$$

$$Ux_{i,j} = \frac{1}{2}(h_{i+1,j} + h_{i,j})u_{i,j}\Delta s$$

$$Uy_{i,j} = \frac{1}{2}(h_{i,j+1} + h_{i,j})v_{i,j}\Delta s$$

2) 입력조건 및 경계조건

삼천포 구항 주변에서의 해수유동을 재현하기 위해 Fig.1과 같이 격자간격을 20m로 하여 154×119의 계산격자망을 구성하였다.

대방수도를 좌측개방경계로, 신항 동방파제와 신수도 끝단을 연결한 우측개방경계로 설정하였다. 개방경계에서의 강제수위는 관측자료를 조화분해한 조화상수값을 사용하여 규칙파형의 조석을 적용하였다. 진폭은 M_2 분조와 S_2 분조의 합을, 위상차는 M_2 조의 지각 h_2 로 하여 좌측개방경계의 진폭은 1.56m 지각은 259.9. , 우측개방경계의 진폭은 1.50m 지각은 250.9. 주기는 12시간 25분으로 채택하였다. 하단개방경계조건은 좌측경계조건과 우측경계조건을 선형보간하여 적용하였다.

계산시간간격은 안정조건을 고려하여 1sec로 하였으며, 수심자료는 해양조사원 간행 해도와 기존의 측량성표를 사용하였고, 약최저저조면의 측정값을 평균해면으로 하기 위해 1.59m를 더하였다.

와동점성계수 ν_t 는 100.0 m^2/sec , 코리올리 계수 $f = 8.3 \times 10^{-5} sec^{-1}$, 해저마찰계수 $\gamma_b^2 = 0.0025$ 으로 입력하였다.

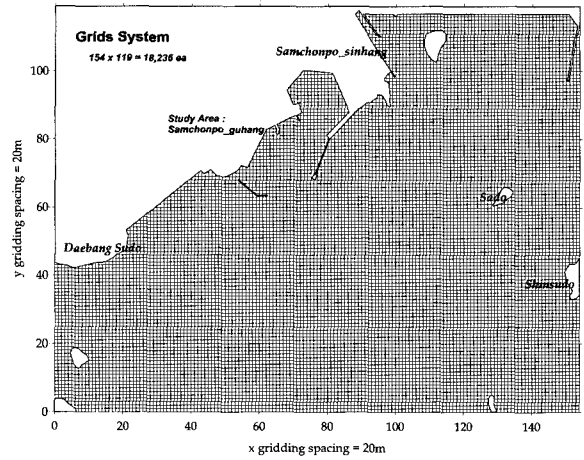


Fig. 1 Computational domain

오염확산 실험의 수심자료, 격자체계, 실험안은 해수유동 실험과 동일하며, 계산 초기시각에 있어서 항내부에 일정하게 분포된 확산물질의 농도영역은 Fig. 2와 같이 $C_0 = 4.0$ 으로 설정하고, 그 밖의 영역은 0.0 으로 가정하였다.

확산계수는 유속이 0일 경우는 0이 되게 하였고, 육지경계면에서의 경계조건은 경계면을 가로질러 이류·확산이 일어나지 않는 것으로 하였다. 오염원은 임의의 위치에서 임의의 농도가 순간적으로 방출되는 것과 연속적으로 방출되는 것이 있는데, 본 실험에서는 순간적인 방출일 경우로 하였다.

오염물질은 체류시간 동안 보존성이 있다고 가정하였다. 이는 보존성 물질이 반응성 물질인 경우보다 상대적으로 해수환경에 영향이 크므로 공학적인 관점에서 더욱 타당하리라 판단된다. 아울러, 수질에 미치는 저질의 영향 및 오염물질의 부하량은 고려하지 않았다.

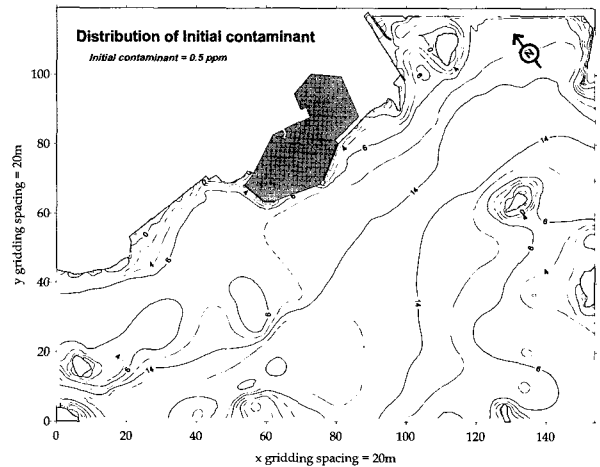


Fig. 2 Distribution of initial contaminant

3) 실험안

먼저 현재 상태의 해수순환 및 오염확산 양상을 파악한 후 (CASE-0), 동방파제 기부측에 60m 길이의 해수소통구를 1개 두는 방안(CASE-1), 기부측에서 20m 간격으로 20m 길이의 해수소통구를 3개 두는 방안(CASE-2)을 실험안으로 설정하였다. 추가로 CASE-1에 대하여 항내 깊숙한 수역까지 유입수를 유도할 수 있도록 방파제 내의 관로에서 역류를 방지함으로써 방파제로부터 항내로의 흐름이 항상 일방향이 되도록 유도하는 일방향 흐름형의 해수교환방파제를 설치하는 경우(CASE-3)와 창조시에 유입류를, 낙조시엔 유출류를 유도할 수 있도록 40m의 도류제를 설치한 양방향 흐름형의 해수교환방파제를 설치하는 경우(CASE-4)를 실험안으로 설정하였다.

3. 수치실험 및 분석

3.1 해수유동 실험

수치실험 결과, 최강창조류와 최강낙조류 벡터도는 Fig.3과 Fig.4에 도시하였다. 창조류는 북서류하면서 대방수도로 유입되면서 가속화하고 낙조류는 이와 반대로 흐른다.

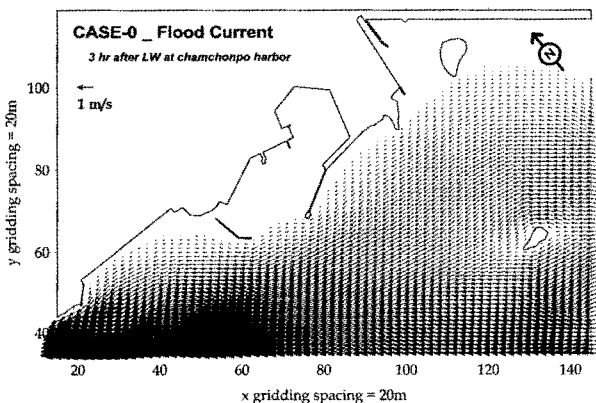


Fig. 3 Calculational result(max. flood tide, CASE-0)

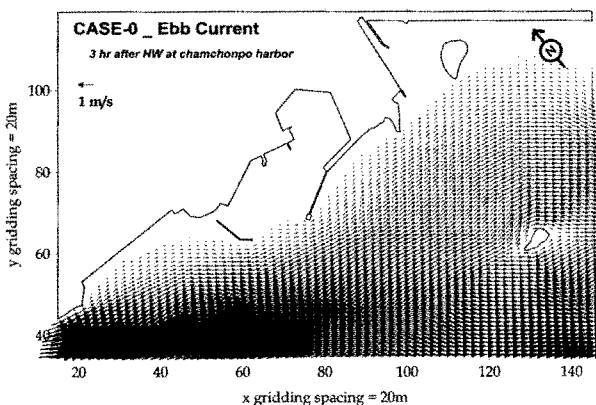


Fig. 4 Calculational result(max. ebb tide, CASE-0)

현재 상태의 항내 해수순환 양상은 항입구부에서 최대 15.5cm/s가 나타나지만 대부분 6cm/s 이하의 유속을 보이며, 창조시엔 시계방향의 와가 낙조시엔 반시계방향의 와가 형성되어 굴입된 만내에 정체수역을 발생하고 있다.

CASE-1, 2의 항내 해수순환 양상의 큰 변화는 없으나 해수소통구 주변에서 3.5cm/s, 3.7cm/s의 유속증가가 나타나고 있으며, 굴입된 만내에서 또다른 와가 형성되어 해수소통구를 통해 유출입되고 있는 양상이다.

CASE-3의 경우는 외해 유입수의 영향으로 항내 유속이 최대 3.8cm/s 증가하며, 동방파제를 따라 유속이 증가하는 양상을 보이고 있으나 최강 낙조를 기점으로 하여 항내 해수순환 양상에는 큰 기여를 못하는 것으로 나타났다.

CASE-4는 창조류의 유입으로 인한 유속의 증가는 CASE-3보다 작은 양상을 보이나 전류시를 기준으로 장기간에 걸쳐 항내 해수순환에 큰 기여를 하는 것으로 나타났다.

3.2 오염확산 실험

실험안별 30조석주기 이후의 확산결과는 Fig. 5, 6, 7, 8, 9에 나타내었다. 현재 상태에서의 확산형태는 조석주기가 경과함에도 불구하고 항내에 오염물질이 여전히 잔류하고 있는 것을 알 수 있다. CASE-1은 소통구를 통해 유입된 해수로 인하여 정체된 오염물질이 분리되어지는 양상을 보이고 있으나 여전히 오염물질 상당량이 잔류하고 있는 것을 알 수 있다. CASE-2의 경우, CASE-1에 비해 유사한 결과이나 항내의 잔류량은 더 높게 나타났다. CASE-3의 경우, 오염물질의 확산형태가 항 입구쪽으로 외해쪽이 많이 이동된 것을 알 수 있다. CASE-4의 결과는 해수소통구를 중심으로 항내·외 간의 해수순환이 활발한 양상을 보이며, 이에 따라 오염물질 확산형태도 외해와 많이 교류되어 항내에 잔류하는 오염물질의 농도가 감소하는 것을 알 수 있다

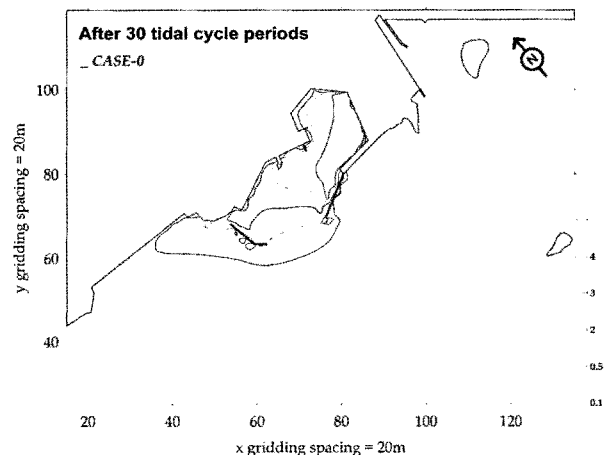


Fig. 5 Distribution of contaminant after 30tidal cycle periods(CASE-0)

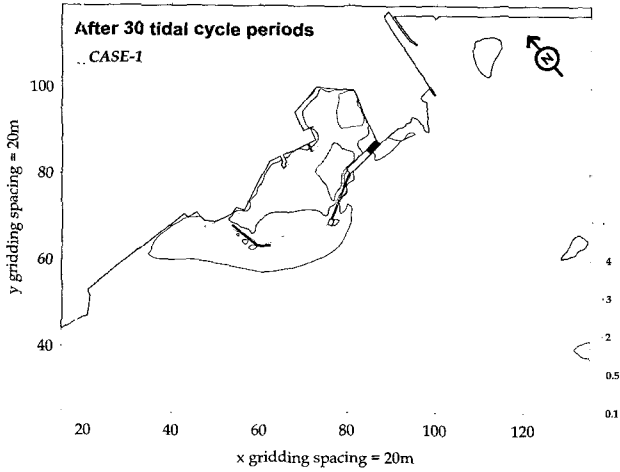


Fig. 6 Distribution of contaminant after 30 tidal cycle periods(CASE-1)

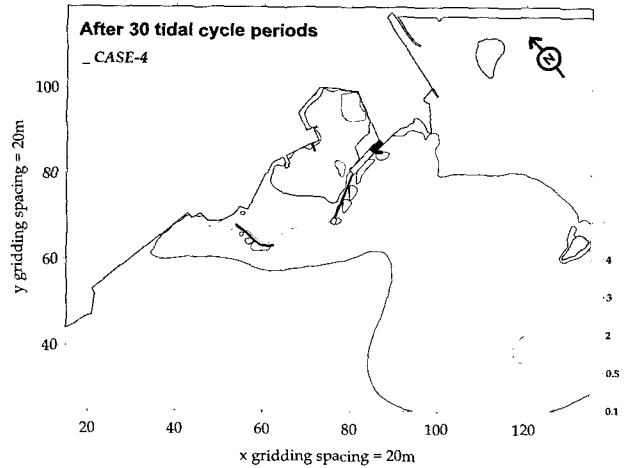


Fig. 9 Distribution of contaminant after 30 tidal cycle periods(CASE-4)

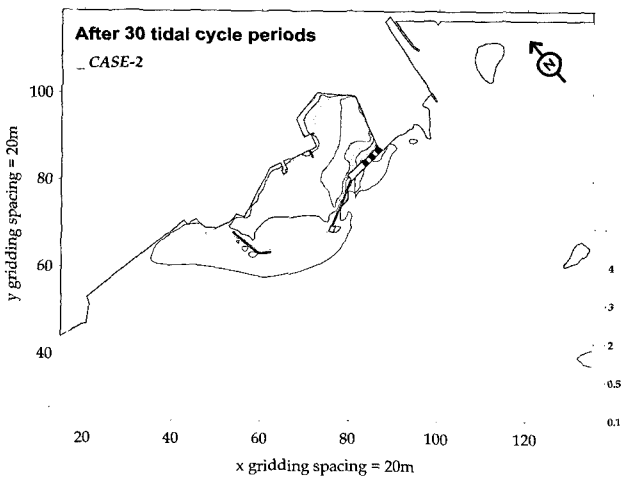


Fig. 7 Distribution of contaminant after 30 tidal cycle periods(CASE-2)

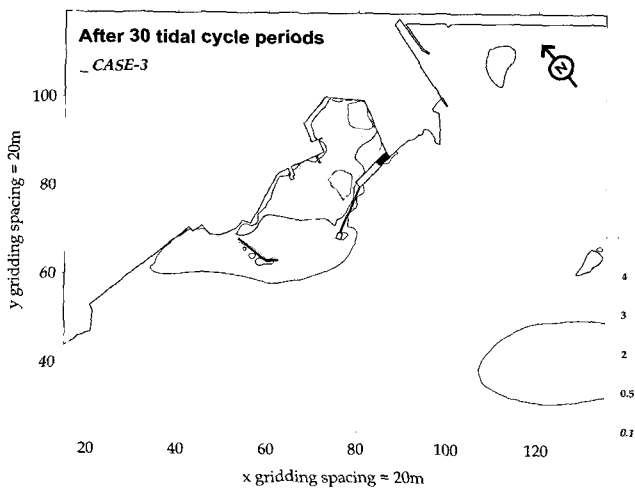


Fig. 8 Distribution of contaminant after 30 tidal cycle periods(CASE-3)

3.3 항내 COD 잔류량 및 해수교환율 평가

Fig.10, 11은 실험안에 대한 항내 COD 잔류량과 희석률에 의한 해수교환율의 시간적인 변화를 나타내었다. 제시된 바와 같이 항내에 잔류하는 오염물질의 시계열 변화는 계산초기에 비하여 5조석주기를 지나면서 COD 감소율이 점차로 줄어들고 있는 것을 알 수 있으며, 30조석주기 후의 오염물질의 잔류량은 CASE-0, 1, 2, 3, 4 각각 3.1087ppm, 2.9717ppm, 2.9748ppm, 2.4622ppm, 2.3723ppm으로 나타났다.

수치실험 결과, 단순 해수소통구를 설치할 경우인 CASE-1, 2는 5조석주기를 지나면서 항내 오염물질의 감소가 거의 비슷한 패턴을 보이고 있어 해수소통구를 통한 수질개선 효과는 미약하다고 판단된다. 또한, 유입수를 항내 깊숙한 수역까지 유도할 수 있도록 방파제 내의 관로에서 역류를 방지함으로써 방파제로부터 항내로의 흐름이 일방향이 되도록 유도한 결과 (CASE-3)보다 외해수와의 교류를 활발하게 한 양방향 흐름형의 해수교환방파제의 도입이 해수교환의 기여도가 높게 나타났다.

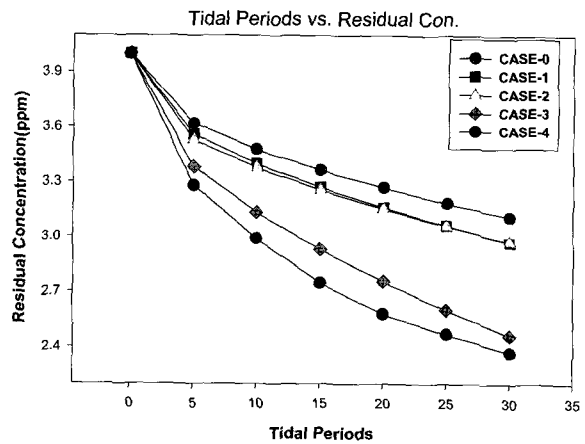


Fig. 10 Residual concentration

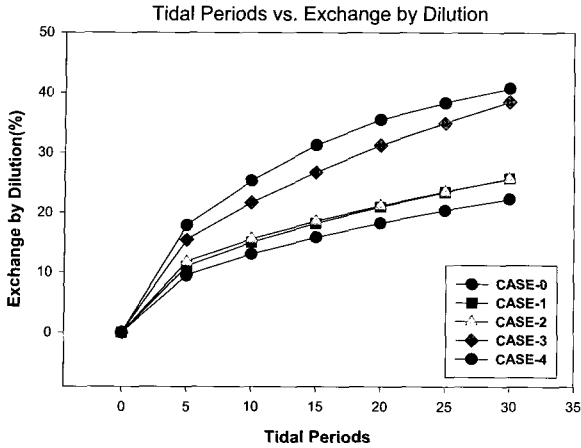


Fig. 11 Exchange by dilution(%)

4. 결론 및 제언

최근의 신항만건설촉진법은 해양 친수공간의 건설 및 운영을 신항만건설사업 내용의 하나로 규정하고 있는 실정이다.

이에 따라 앞으로의 항만은 인간에게 쾌적함을 주고 환경부하가 적도록 계획되어야 할 것이다.

본 연구에서는 기존의 오염이 심화된 항만을 대상으로 해수유동과 오염확산을 평면 2차원 모형을 적용하여 20m간격의 격자로 모델을 수립하고 해수소통구 설치전후에 대한 수치시뮬레이션을 행하여 비교·분석하였으며, 항만 정체수역에 초기농도를 주어 조석변동에 따른 오염확산을 실험하고 항만내에 잔류한 확산물질의 농도를 정량적으로 평가하였다.

대상항만은 방파제로 차폐되어 항내 해수순환에 큰 문제를 가지고 있으며 단순한 해수소통구를 통하여 해수순환의 제약을 극복하기는 어려우므로 별도의 방법이 필요하다고 판단된다. 따라서, 해수교환방파제의 개념을 도입하여 수질개선에 미치는 효과를 수치모형실험을 수행한 결과, 조석이 우세한 삼천포 구항의 경우, 일방향 흐름을 유도할 수 있는 해수교환방파제의 도입보다 외해와의 많은 교류를 유도할 수 있는 양방향 흐름형의 해수교환방파제의 도입이 항내 해수순환 및 해수교환에 기여하는 정도가 높게 나타났다.

파랑이 우세한 해역에 대한 예측실험에서 주요 입력자료인 해수교환방파제를 통한 해수 유입량 산정은 매우 중요하다 할 것이다. 현재까지는 수리모형 실험을 통한 유입량의 산정이 가장 합리적이지만 중·소규모의 항만개발에 있어서 수리모형 실험에 소요되는 비용이 너무 많기 때문에 해수교환 방파

제의 효과를 예측하기 위한 수치모형 실험이 대체수단이 될 것이다. 따라서, 장래에도 이러한 유입량을 예측하기 위한 보다 많은 시도가 이루어지기를 바란다.

참고 문헌

- [1] 마산지방해양수산청(2001), 삼천포항 수치모형실험 보고서.
- [2] 장선덕, 이문옥, 김종규, 김종화, 류정로, 이종섭, 홍철훈(1999), 연안해양학.
- [3] 해양수산부(1999), 해수교환방파제의 실용화 연구(I).
- [4] 한국해양연구원(2001), 연안개발, 해양과학총서 제6권.
- [5] 金子安雄, 堀江毅, 村上和男(1975), "ADI法による潮流汚染擴散の數値計算", 港灣技術 研究報告書 第14卷 第1號 pp.53-60.
- [6] 鞠承淇(1998), "潮汐殘差流の創造・制御による閉鎖性海域の水質改善に關する研究", 九州大學工學部建設都市工學科.
- [7] Awaji, T.(1982), "Water Mixing in a Tidal Current and the Effect of Turbulence on Tidal Exchange through a Strait", J. Phys. Oceanogr., Vol. 12, pp. 501-514.
- [8] Bolin, B. and H. Rohde(1973), "A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs", Tellus, Vol. 25, No. 1, pp. 58-62.
- [9] Coe, J. M., Roser, D. B.(1996), "Marine Debris, Source, Impact, and Solution", Spring, N. Y.
- [10] Koutitas, C. G.(1982), "Elements of computational hydraulics", Pentech Press..
- [11] Koutitas, C. G.(1988), "Mathematical models in coastal engineering", Pentech Press.
- [12] Pugh, D. T.(1987), "Tides, Surges and Mean Sea-Level", John Wiley & Sons Ltd.
- [13] Fischer, H. B., Koh, R. C. Y., Imberger, J. and Brooks, N. H.(1979), "Mixing in Inland and Coastal Waters", Academic Press.
- [14] Kashiwai, M.(1984), "The concept of tidal exchange and the tidal exchange ratio", J. Oceano. Soc. Japan, 40, pp. 135-147.

원고접수일 : 2003년 3월 28일

원고채택일 : 2003년 6월 13일