

## 항내오염 개선을 위한 친환경 외곽시설에 관한 연구

김강민\* · 강석형\*\* · 유하상\*\*\* · 김상훈\*\*\*\*

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

### A Study of environment-friendly outer wall facilities for the improvement of port pollution

*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 설치하여 외해의 에너지가 항내로 전달되어 항내 오염물질의 희석률 증대와 함께 외해로 배출되도록 하고 있다. 오염이 심화된 항만에서 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 검토하고 수반되는 해수교환율을 검토하고자 한다. 이를 위해 해수유동 및 오염확산 수치모델을 구축하고 대안에 따른 항내의 해수순환 및 해수교환율을 평가하였다.

**핵심용어** : 방파제, 해수교환, 수질, 해수소통구, 수치모델

**ABSTRACT** : Due to the impermeability of outer wall facilities such as Breakwaters which dissipates the wave energy and keeps harbor tranquility, the water exchange can be worse and increased enclosed at the harbor. 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. To this hence, 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 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, the tidal exchange in Samchonpo-guhang before and after installation of drain-route is assessed.

**KEY WORDS** : Outer wall facilities, Breakwaters, water exchange, Water-Front, water quality, drain-route, numerical computation, circulation of harbor waters, tidal exchange, FDM

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

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

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

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

### 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 부족이 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 신항만건설촉진법은 해양 친수공간의 건설 및 운영을 신항만 건설사업 내용의 하나로 규정하고 있는 실정이다(연안개발, 한국해양연구원).

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 농도의 잔류량과 퇴적물에 의한 해수교환율을 산정하고자 하였다. 모델링은 모델의 구축, 검증, 예측실험의 순서로 수행되었으며, 사용된 수치모형은 유한차분법에 근거한 2차원 연직적분 모형이다.

### 2. 본 론

#### 2.1 지배방정식

##### (1) 해수유동 모델링 지배방정식

수치계산은 ADI(Alternating Direction Implicit)법에 기초한 평면 2차원 단층 모델을 사용하였다. 장파근사에 기준을 둔 평면 2차원 유체의 지배방정식은 다음과 같다. 단, 압력항은 정수압만을 고려하는 것으로 하였다.

##### 1) 연속방정식

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

##### 2) x, y방향의 운동방정식

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial UM}{\partial x} + \frac{\partial UN}{\partial y} - fN = -g(h + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu_t \frac{\partial M}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu_t \frac{\partial M}{\partial y} \right] \tag{2}$$

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

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial UN}{\partial x} + \frac{\partial VN}{\partial y} + fM = -g(h + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu_t \frac{\partial N}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu_t \frac{\partial N}{\partial y} \right] \tag{3}$$

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

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 (m<sup>3</sup>/sec)

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

$\zeta$  : 조위

$h$  : 평균수심

$\nu_t$  : 와동점성계수

$\gamma_b^2$  : 해저마찰계수

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

$f$  : 코리올리 계수

##### (2) 오염확산 모델링 지배방정식

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (E_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (E_y \frac{\partial C}{\partial y}) - u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} + S_i + S_o \tag{4}$$

여기서, C는 보존량의 농도, u, v는 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).

$$E_x = 8.72 n u |h|^{5/6}$$

$$E_y = 8.72 n v |h|^{5/6} \tag{5}$$

여기서, n는 조도계수이며 u, v는 각 방향별 유속, h는 총수심이다.

##### 2.2 모형의 수립 및 시뮬레이션

삼천포 구항은 서부경남에 위치한 무역항으로서 동쪽으로는 대방수도와 진주만이, 남쪽으로는 창선도와 남해도가, 서쪽으로는 자란만, 고성만이 위치하며 전면해역으로는 크고 작은 섬들이 산재하고 있다. 파랑의 영향은 S, SE방향의 영향이 탁월한 것으로 분석되며, 조류의 경우 반일주조형의 왕복성 조류가 주축을 이루고 있다. 창조류는 북서류하면서 대방수도로 유입되면서 가속화하고 낙조류는 이와 반대로 흐른다. 파랑의 영향보다는 조석의 영향이 우세한 해역으로 분석되었다.

실험안은 기존의 동방파제의 기부측에 해수소통구를 설치하는 것으로 설정하여 실험을 수행하였다.

(1) 해수유동

현재상태에 대한 해수순환 양상을 파악하기 위하여, 해수유동을 수치계산에 의하여 재현하고 문제점을 도출하여 수질개선책으로 동방파제에 해수소통구를 설치하는 안을 적용하기로 한다.

현재상태의 지형에 대하여 격자(grid)로 분할하고 모델을 다음과 같은 조건에서 수립하였다.

- 격자간격  $\Delta x = \Delta y = 20m$
- 시간간격  $\Delta t = 1 sec$
- 경계조건(개방경계)

1) 좌측경계

- 진폭 ( $M_2 + S_2$ 조)  $a = 156 cm$
- 주기  $T = 12 hrs 25 min.$
- 지각  $\phi = 259.9^\circ$

2) 우측경계

- 진폭 ( $M_2 + S_2$ 조)  $a = 150 cm$
- 주기  $T = 12 hrs 25 min.$
- 지각  $\phi = 250.9^\circ$

- 와동점성계수  $\nu_t = 100.0 m^2/sec$
- 코리올리 계수  $f = 8.3 \times 10^{-5} sec^{-1}$
- 해저마찰계수  $\gamma_b^2 = 0.0025$

계산영역은 Fig. 1과 같다. Fig. 2는 창조시의 해수유동 패턴을 나타낸 것이다. 실험안에 대한 최강창조류의 유속증가는 현재상태와 비교하여 해수소통구 부근에서 최대 3.6cm/s의 증가가 나타났으며, 동방파제를 따라 유속의 증가가, 반대편엔 감소가 나타나는 양상을 보이고 있다.

(2) 오염확산

본 연구에서 선정한 수질지표는 일반적으로 채용하고 있는 화학적산소요구량(COD, Chemical Oxygen Demnad)으로 결정하였다. 해수소통구로 인한 수질개선 효과를 검토하기 위하여 항내의 COD 잔류량과 희석률에 의한 해수교환율의 개념을 도입하였다. 해수교환율은 실제 해역의 오염양상을 파악하기 위해 항내 초기오염영역에 대한 최초의 항내 평균 COD농도와 비교하여 감소된 COD농도의 비율로 정의하여 계산하였다. 수심자료, 격자체계, 실험안은 해수유동 실험과 동일하며, 계산 초기시각에 있어서 항내부에 일정하게 분포된 확산물질의 농도영역은 Fig. 3과 같이  $C_0 = 4.0$  으로 설정하고, 그 밖의 영역은 0.0 으로 가정하였다.

확산계수는 유속이 0일 경우는 자동적으로 0이 되게 하였고, 육지경계면에서의 경계조건은 경계면을 가로질러 이류·확산이 일어나지 않는 것으로 하였다. 오염원은 임의의 위치에서

임의 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.

실험안별 30조석주기 이후의 확산결과는 Fig. 4, Fig. 5에 나타내었다. 이 결과에 의하면 해수소통구 설치전의 확산형태는 조석주기가 경과함에도 불구하고 항내에 오염물질이 여전히 잔류하고 있는 것을 알 수 있다. 동방파제 기부측에 해수소통구를 설치한 실험안에 대한 결과는 Fig. 5에 도시한 바와 같이, 소통구를 통해 유입된 해수로 인하여 정체된 오염물질이 분리되어지는 양상을 보이고 있다. 소통구가 방파제 기부측에 위치하여 항내 순환양상을 위한 충분한 흐름은 발생시키지 못하여 여전히 오염물질이 항내에 잔류하고 있는 것으로 나타났다.

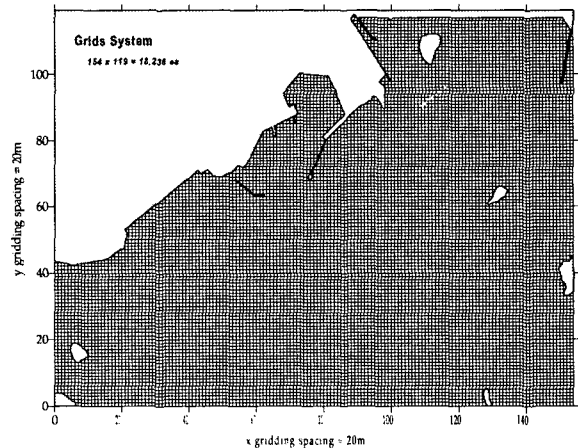


Fig. 1 Computational domain

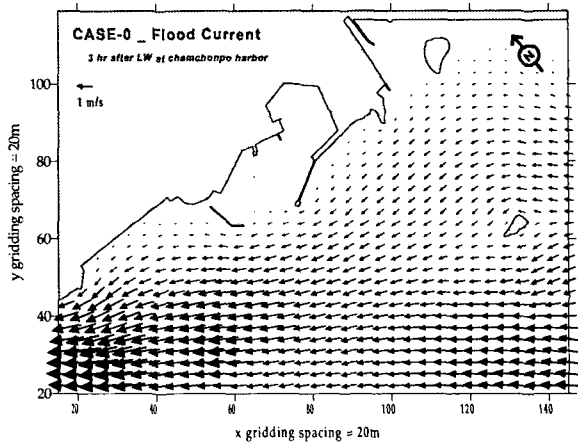


Fig. 2 Calculation result(max. flood tide, CASE-0)

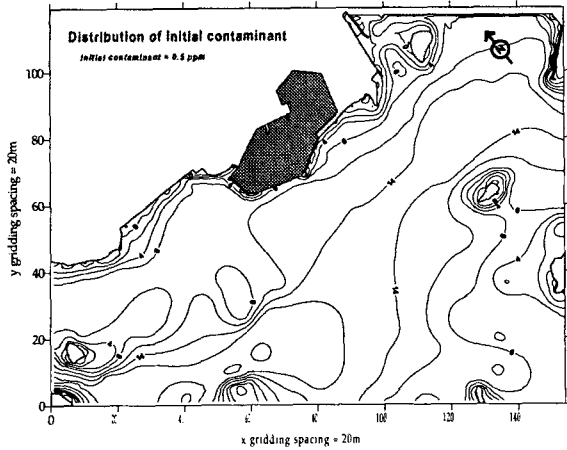


Fig. 3 Distribution of initial contaminant

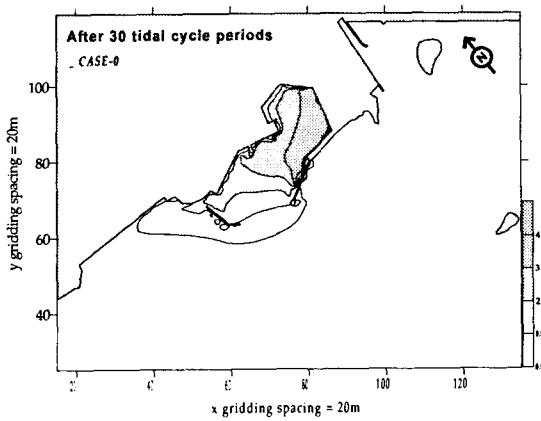


Fig. 4 Distribution of contaminant after 30 tidal cycle periods

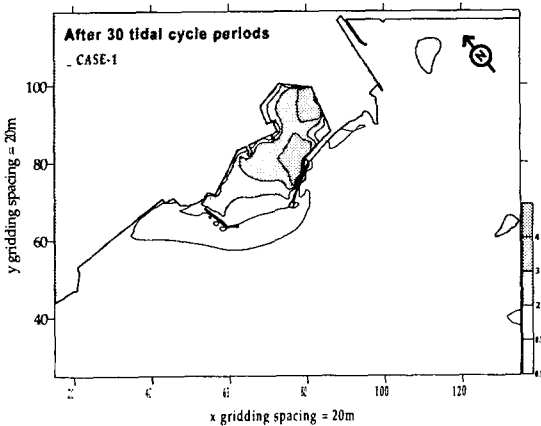


Fig. 5 Distribution of contaminant after 30 tidal cycle periods

2.3 항내 COD 잔류량 및 해수교환을 평가

Fig. 6에 해수소통구 설치 전·후에 대한 항내 오염물질 잔류량의 시간적인 변화를 나타내었다. 제시된 바와 같이 항내에 잔류하는 오염물질의 시계열 변화에서는 계산초기에 비하여 15조석주기를 지나면서 감소량이 점차로 줄어들고 있는 것을 알 수 있으며, 설치전·후에 대한 30조석주기 후의 오염물질의 잔류량은 3.1087ppm, 2.9717ppm으로 나타났다. 해수소통구 설치 후의 경우 5조석주기를 지나면서 항내 오염물질의 감소가 거의 비슷한 패턴을 보이고 있어 이류에 의한 오염물질의 감소보다는 난류확산과 이로 인한 희석에 의한 오염물질 감소에 큰 기여를 하고 있다고 판단된다.

따라서, 본 해역에 있어서는 난류확산에 기인하는 오염물질의 감소가 주를 이루고 있기 때문에 항내의 해수를 항외로 전달할 수 있는 에너지를 유입할 수 있는, 이류에 의한 확산을 유발할 수 있는 새로운 대안을 설정해야 할 것으로 판단된다.

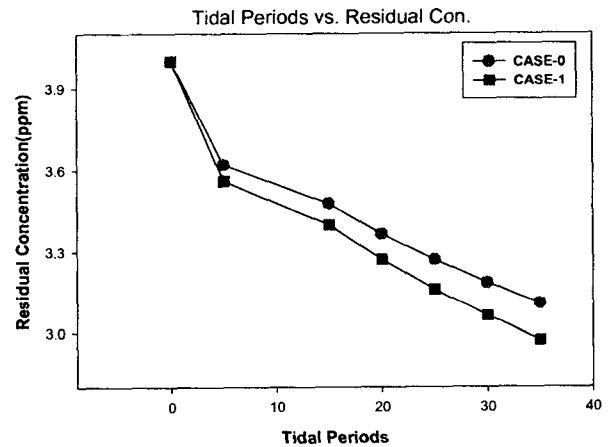


Fig. 6 Residual concentration

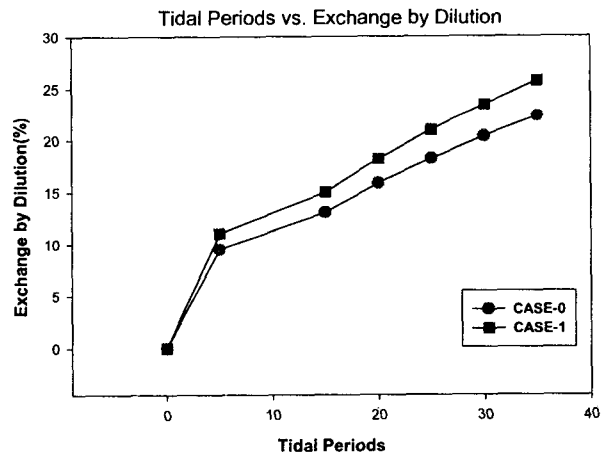


Fig. 7 Exchange by dilution(%)

2.4 대안선정

방파제의 근본적인 목적은 파랑으로부터의 항만시설의 보호에 있다. 해수교환방파제의 개념은 항외의 파랑 에너지를 항내 정온을 유지하는 범위내에서 이용하는 것이라 할 수 있다. 삼천포 구항의 경우 항내오염의 주요 원인은 항내 해수순환이 미약하여 외해와의 해수교환율이 작기 때문이다. 따라서, 본 연구에서 대안으로 해수교환방파제의 개념을 도입하기로 한다. 해수교환방파제는 방파제 기부측에 위치하여 유입수를 항내 깊숙한 수역까지 유도할 수 있도록 하고, 방파제 내의 관로에서 역류를 방지함으로써 방파제로부터 항내로의 흐름이 항상 일방향이 되도록 유도함이 필수적이라 할 수 있겠다.

해수교환방파제를 선정하기 위해선 수리모형실험이 선행되어야 하나, 본 연구에서는 외해 해수가 해수소통구를 통하여 30일만에 유입되는 안을 대안(0.45m/s)으로 설정하여 실험을 수행하였다. 삼천포 구항의 항내 수역의 총체적인 1,178,914.5m<sup>3</sup>에 해당한다.

Fig. 8은 해수순환 예측실험 결과이며, Fig. 9는 오염확산 실험 결과이다. 그림에 제시된 바와 같이, 외해 유입수의 영향으로 항내의 유속이 최대 3.8cm/s 증가하고, 아울러, 동방파제를 따라 유속이 증가하는 양상을 보이고 있다. 이에 따른 오염물질의 확산형태도 외해쪽이 많이 이동되어진 것을 알 수 있다.

항내 COD 잔류량은 Fig. 6에 나타난 바와 같이, 30조석주기 후의 항내 잔류량은 2.4622ppm으로 나타났다.

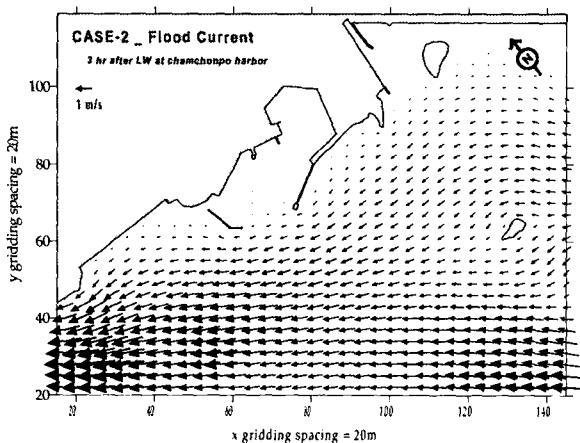


Fig. 8 Calculational result(max. flood tide, CASE-2)

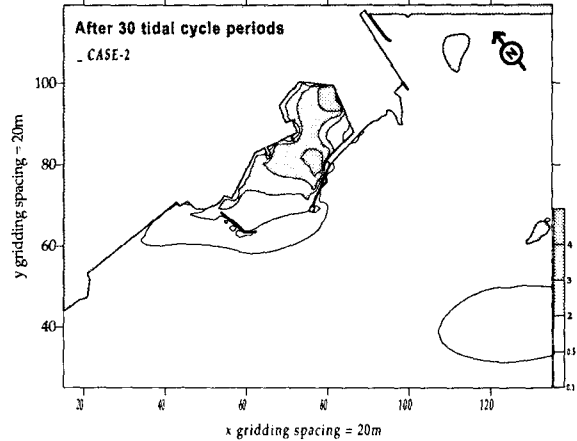


Fig. 9 Distribution of contaminant after 30 tidal cycle periods

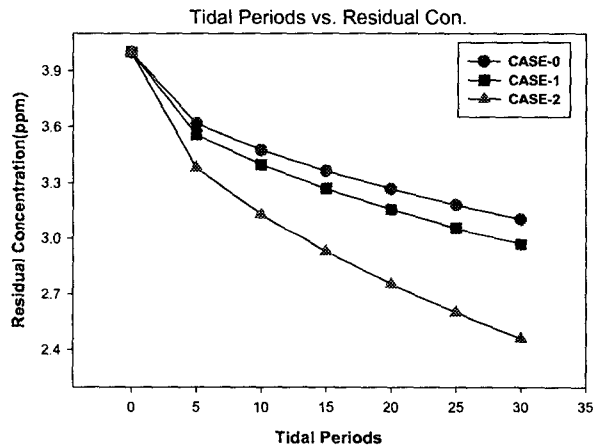


Fig. 6 Residual concentration

3. 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 해수 유동과 오염확산을 평면 2차원 모형을 적용하여 20m간격의 격자로 모델을 수립하고 해수소통구 설치전후에 대한 수치시뮬레이션을 행하여 비교·분석하였으며, 항만 정체수역에 초기농도를 주어 조석변동에 따른 오염확산을 실험하고 항만에 잔류한 확산물질의 농도를 정량적으로 평가하였다.

대상항만은 방파제로 차폐되어 항내 해수순환에 큰 문제를 가지고 있으며 단순한 해수소통구를 통하여 해수순환의 제약을 극복하기는 어려우므로 별도의 방법이 필요하다고 판단된

다. 따라서, 해수교환방과제의 개념을 도입하여 수질개선에 미치는 효과를 수치모형 실험을 수행한 결과, 항내 해수순환 및 해수교환에 기여하는 정도가 높게 나타났다.

예측실험의 주요 입력자료인 해수교환방과제를 통한 해수 유입량의 선정은 매우 중요하다 할 것이다. 현재 수치모형실험을 통한 유입량의 산정이 유일하며 중·소규모의 항만개발에 있어서 수치모형실험에 소요되는 비용은 크다고 할 수 있다. 따라서, 앞으로 이러한 유입량을 결정할 수 있는 보다 많은 연구가 필요하다고 사료된다.

tidal exchange ratio, J. Oceano. Soc. Japan, 40, pp. 135-147 1984.

## 참 고 문 헌

1. 마산지방해양수산청, “삼천포항 수치모형실험 보고서”, 2001.
2. 장선덕 외, “연안해양학”, 1999.
3. 해양수산부, “해수교환방과제의 실용화 연구( I )”, 1999.
4. 金子安雄, 堀江毅, 村上和男, “ADI法による潮流汚染擴散の數値計算”, 港灣技術 究報告書 第14券 第1號 1975.
5. 鞠承淇, “潮汐殘差流の創造・制御による閉鎖性海域の水質改善に関する研究”, 九州大學工學部建設都市工學科, 1998.
6. Awaji, T., “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, 1982.
7. Bolin, B. and H. Rohde, “A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs”, Tellus, Vol. 25, No. 1, pp. 58-62, 1973.
8. Coe, J. M., Roser, D. B., “Marine Debris, Source, Impact, and Solution”, Spring, NY, 1996.
9. Christopher G. Koutitas, “Elements of computational hydraulics”, 1982
10. Christopher G. Koutitas, “Mathematical models in coastal engineering”, 1988
11. David T. Pugh, “Tides, Surges and Mean Sea-Level”, 1987
12. Fischer et. al., “Mixing in Inland and Coastal Waters”, 1979.
13. Kashiwai, M., “The concept of tidal exchange and the