

## 항만개발에 따른 수질변화 및 개선책에 관한 연구

국승기\* · 이중우\*\* · 최성용\*\*\* · 김강민\*\*\*\*

### A Study on the Changes of Water Quality due to the Development of Harbor and its Improvement

*S. G. Gug · J. W. Lee · S. Y. Choi · K. M. Kim*

**Key Words**: 해수유동(Movement of Sea Water), 오염물 확산(Pollutant Dispersion), ADI 법 (Alternating Direction Implicit Method), 저면조도(Bottom Roughness), 조석잔차류(Tidal Residual Current), 해수교환(Tidal Exchange), 잔류율(Remaining Rate)

#### Abstract

It is very important to quantitatively assess the movement of sea water and pollutant dispersion before or after constructing shore structures such as breakwaters considering marine environment, and long-term utilization of those structures. This assesment is possible through the use of simulation models designed to predict water movement and pollutant dispersion in a certain area.

In this study, the numerical computations were carried out to predict the sea water quality in the Ilgwang Harbor located at the east coast of Pusan. The flow patterns were investigated before and after the development of Ilgwang Harbor. The computational models adopting ADI Method(Alternating Direction Implicit Method) were used here and were already verified from the previous studies. As a result of this study, the tidal exchange in Ilgwang Harbor after development proved to be worse due to the increased semi-enclosed at the harbor limit. In order to improve the water quality of this area after development, a new method was proposed to improve water quality in the semi-enclosed bay by creation and

---

\* 정회원, 한국해양대학교 해사대학 해양경찰학과 교수

\*\* 정회원, 한국해양대학교 공과대학 토목환경공학부 교수

\*\*\* 정회원, 마산 지방해양수산청

\*\*\*\* 정회원, 한국해양대학교 대학원 토목환경공학과

control of tidal residual currents. For this purpose, the unsymmetric structures, so called bottom roughness were introduced in this study. The simulation was carried out on the basis of the study by Komatsu et. al. and Gug and we made a conclusion that it is possible to generate a new tidal residual current and to increase the tidal exchange by application of bottom roughness arrangement.

## 1. 서론

대규모의 자원과 시간이 소요되는 새로운 항만의 계획 및 개발에서 이들을 적용한 항만건설 후의 해수유동 및 오염물질 확산의 영향을 예측하는 것은 항만의 운용·관리면과 해양환경보전의 측면에서 극히 중요하다고 하겠다. 따라서 항만내 구조물을 건설하기 전의 수리특성을 파악하여 건설 후의 주변환경에 미치는 영향을 비교 분석할 필요가 있다. 특히, 연안의 내만이나 어항 등에는 폐쇄성 해역이 많이 존재하고 있고, 외해와의 해수교환이 일어나기 어려워 만내수의 정체에 의한 만성적인 수질악화가 심각한 문제로 되어 왔다.

따라서, 본 연구에서는 개발계획이 있는 항만에서 개발 전후에 조석주기의 변화에 따른 해수유동 및 오염물 확산을 수치계산에 의하여 재현하여 발생한 문제점을 도출하고, 이렇게 도출된 문제점을 해결하기 위한 한 방법으로 흐름의 방향에 의해 저항특성이 다른 비교적 소규모의 구조물 즉 '저면조도'의 개념을 도입하여 수질개선 효과를 수치계산을 통하여 검토하였다. 적용 항만으로 동부산 기장군 해안쪽에 위치한 일광항을 선택하였다.

## 2. 지배방정식

### 2.1 해수유동 지배방정식

장파근사에 기준을 둔 평면 2차원 유체의 지배방정식은 다음과 같다. 단, 압력항은 정수압만을 고

려하는 것으로 하였다.

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

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

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

여기서,  $U, V$  : x, y 방향의 단면 평균 유속

$M, N$  : x, y 방향의 선유량 ( $m^2/sec$ )

$\xi$  : 조위

$h$  : 평균수심

$\nu_t$  : 와동점성계수

$\gamma_b^2$  : 해저마찰계수

$f$  : 코리올리 계수

### 2.2 오염물 확산 지배방정식

2차원화된 물질확산의 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial [(\xi+h)C]}{\partial t} + \frac{\partial [(\xi+h)UC]}{\partial x} + \frac{\partial [(\xi+h)VC]}{\partial y} \\ & = \frac{\partial [(\xi+h)D_x \frac{\partial C}{\partial x}]}{\partial x} + \frac{\partial [(\xi+h)D_y \frac{\partial C}{\partial y}]}{\partial y} + q_m \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $C$  : 수심 평균 농도

$D_x, D_y$  :  $x, y$ 방향의 확산계수

$q_m$  : 유입부하량

해저마찰계수  $\gamma_b^2 = 0.0026$

대상항만의 개발 전후의 해수유동실험에 대한 상세한 자료는 이전의 이와 국의 연구<sup>2)</sup>에서 수행된 바 있다.

대상해역에서 개발 후에 적용한 계산영역은 Fig. 1과 같다. Fig. 2는 낙조시 항만개발 후의 해수유동

### 3. 모델의 수립 및 수치시뮬레이션

개발계획에 따른 해수유동 및 오염물 확산의 변화를 확인하기 위하여, 항만개발 전후에 대해 해수유동을 수치계산에 의하여 재현하고 문제점을 도출하여 새로운 기법을 도입한 수질개선책을 적용하기로 한다. 여기서, 수치계산은 ADI(Alternating Direction Implicit)법에 기초한 평면 2차원 단층 모델을 사용하였다.<sup>1)</sup>

#### 3.1 해수유동

해수유동을 해석하기 위하여 항만개발 전의 지형에 대하여 격자(grid)로 분할하고 모델을 다음과 같은 조건에서 수립하였다.<sup>2)</sup>

- 수평격자간격  $\Delta x = \Delta y = 50m$
- 시간간격  $\Delta t = 1 sec$
- 경계조건(개방경계) : 우측 개방경계에서는 상단개방경계와 하단 개방경계와의 조석의 위상 변화차를 선형적으로 내삽하였다.

##### (1) 상단경계

- 진폭 ( $M_2$ 조)  $a = 27 cm$
- 주기  $T = 12 hrs 25 min.$
- 지각  $\phi = 218^\circ$

##### (2) 하단경계

- 진폭 ( $M_2$ 조)  $a = 27 cm$
- 주기  $T = 12 hrs 25 min.$
- 지각  $\phi = 223^\circ$

와동점성계수  $\nu_t = 100.0 m^2/sec$

코리올리 계수  $f = 8.3 \times 10^{-5} sec^{-1}$

Meshiga.srf, ilgwang harbor, after development

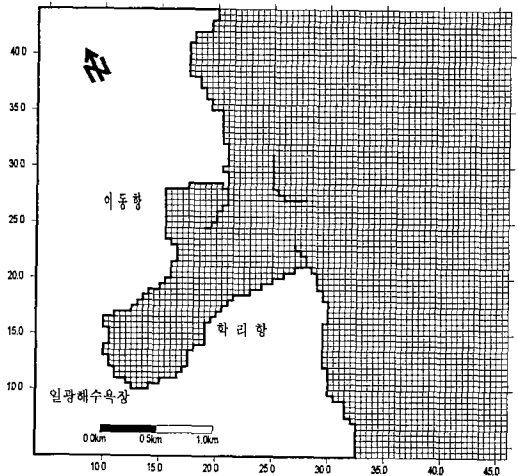


Fig. 1 Computational domain

EBBILA.SRF, ilgwang harbor, after development

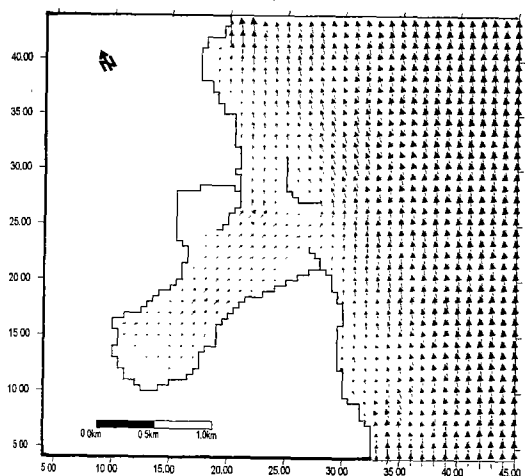


Fig. 2 Calculational result  
(max. ebb tide)

패턴을 나타낸다.

3.2 오염물 확산

오염확산은 이전의 연구에서의 조건과 같이 계산의 초기시각에 있어서 항내부에 일정하게 분포된 확산물질의 농도  $C = 10.0$ 으로 하고, 항내의 오염물질이 많이 배출되고 있는 한 점을 선정하여 계속적으로 오염물질을 배출시켜서 15주기의 조석변동에 따라 항내외에 유동 확산한 후, 항내에 잔류한 확산물질의 농도를 기본으로 하여 정량적으로 평가하는 방법을 사용하였다. 오염물 확산의 계산 조건 및 경계조건은 다음과 같다.

- 수평격자간격  $\Delta x = \Delta y = 50m$
- 시간간격  $\Delta t = 20sec.$
- 확산계수  $D_x, D_y : 1.0 \times 10^4 cm^2/sec.$
- 개방경계에 있어서 경계조건
  - 창조시  $C = 0.0$
  - 낙조시  $\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = 0$

확산계수는 그 크기가 넓은 범위에 걸쳐 있고, 대상에 따라 달리 선택할 수 있으므로 본 연구에서는 Elder의 식<sup>3)</sup>에 의해서 추정가능하며 대상해역에 대한 기존의 연구<sup>4)</sup>와 거의 비슷한 order를 가지도록 설정하였다. 해수유동 시물레이션에서 얻어진 유속자료를 이용하여 개발 전·후 해양오염물의 확산양태를 시물레이션을 실시하여 개발의 영향을 평가하였다. 오염물 확산의 계산조건은 이전의 연구와 동일하며 항만개발 후 5주기와 15주기 이후의 확산결과를 Fig. 7(a)와 Fig. 8(a)에 나타낸다.

이 결과에 의하면 항만개발 전에 비해, 건설예정인 방파제 등에 의해서 폐쇄성이 증가하기 때문에 해수교환율이 다소 감소하고 있어서, 폐쇄성 해역에 있어서의 수질개선 방안을 대상해역에 대하여 적용해 보기로 하였다.

4. 저면조도를 이용한 수질 개선책

항만개발의 결과로 인한 폐쇄성의 증가 또는 본래가진 폐쇄성 때문에, 만내의 수질이 악화된 해역에서 이를 개선하기 위한 방법으로 저면조도를 이용한 새로운 수질개선책이 제안되어 있다.<sup>5)</sup> 저면조도를 이용하는 방법은 흐름의 방향에 따라 저항이 다른 3차원 저면인공조도(저면조도)를 만내의 해저면에 배치하여 잔차류를 창조하거나 제어하고자 하는 것이다.(Fig. 3 참조)

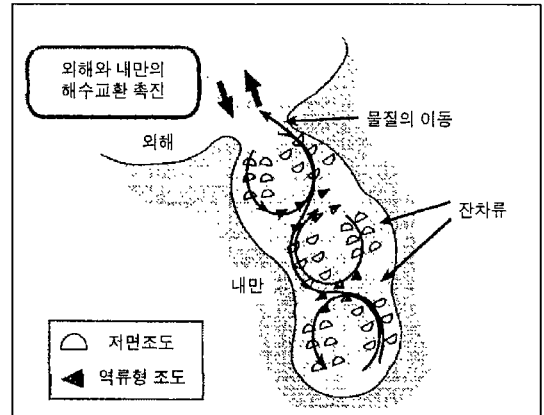


Fig. 3 Creation and control of residual current by bottom roughness

이 방법은 만내에 있어서 저면조도를 자유로이 배치하는 것이 가능하기 때문에 해수교환이 유리하게 되도록 잔차류의 패턴을 자유로이 설계하는 것이 가능하게 된다. 조도형상을 달리함에 따라 큰 조도차를 얻는 것이 가능하여 효율적으로 해수유동을 제어할 수 있을 것으로 기대된다.

평면 2차원 모델에 의한 해수유동 시물레이션에서는 해저마찰에 의한 저면 전단력을 다음의 식과 같이 평가한다.

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \gamma_b^2 U |U| \tag{5}$$

여기서,  $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$  : 저면 전단력 벡터

$\gamma_b^2$  : 해저마찰계수

$U = (U, V)$  : 수심 평균 유속 벡터

$\rho$  : 해수의 밀도

해저마찰계수는 鷲見(1982)<sup>6)</sup> 등이 정리한 과거의 대표적인 관측결과에서는  $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 의 Order로 폭넓은 값을 갖는 것으로 확인되었다. 본 연구에서는 통상 사용되고 있는  $\gamma_b^2 = 0.0026$ 을 기준으로 하여 이용했다.

小松(1997)<sup>7)</sup> 등은 3차원 형상의 저면조도의 주방향의 저항특성을 조사하기 위하여 개수로의 흐름에 설치된 저면조도에 작용하는 항력을 순류(저항이 작은 방향의 흐름)와 역류(저항이 큰 방향의 흐름)의 양방향에 대하여 조도의 높이에 대한 상대수심 및 레이놀즈수(Reynolds Number)를 다양하게 변화시킨 수리조건하에서 측정하였는데, 유효한 조도형상 중의 하나인 1/4구형의 경우  $\Delta C_d \approx 1.0$  정도로 되는 것이 확인되었다. 그래서 저면조도를 설치한 경우에는 방향에 의한 해저마찰계수차가 전체 조도에 영향을 준다는 것으로 가정하여, 다음 식에서 저면조도를 설치한 경우의 해저마찰계수차  $\Delta\gamma_b^2$ 를 산정하였다.

$$\Delta\gamma_b^2 = \frac{n}{A_b} A \frac{\Delta C_d}{2} \quad (6)$$

여기서  $n$  : 면적  $A_b$ 당 조도의 설치계수

$A$  : 흐름에 직각한 면에 대한 조도의 투영면적

$\Delta C_d$  : 조도의 항력계수차

본 연구에서는 항만을 대상으로 하고 있기 때문에 해역을 항행하는 선박의 안전성에 대한 배려도 중요한 조건이 된다. 따라서 저면조도 높이의 한계는 수심의 20%정도로 하여 산정한다. 여기서는 순

류방향에  $\gamma_b^2 = 0.0026$ , 역류방향에  $\gamma_b^2 = 0.0106$ 을 적용하여 저면조도의 배치에 따른 효과를 시물레이션의 적용에서 입력치로 하였다.

#### 4.1 해수유동 시물레이션

방향특성을 가진 저면조도의 배치에 의해 해수유동의 패턴을 변화시킬 수 있는가를 확인하기 위하여 개발 후의 지형에 대하여 ADI법에 의한 평면 2차원 해수유동 시물레이션을 행하였다. 계산조건은 3.1절과 동일하다.

만내에 저면조도를 배치한 경우를 검토의 대상으로 하고 있으므로 본 연구에서의 저면조도와 그 배치에 의한 영향을 검토하기 위해 Case A, B 두 경우에 대해서 시물레이션을 행하기로 한다.

Fig. 4와 Fig. 5에 표시한 바와 같이, 조도를 설치한 두 가지의 경우를 고려하기로 한다. Case A는 방파제의 동쪽 외해쪽에서 해수를 유입시켜 방파제 북쪽으로 해수를 유출시키려고 시도하였으며 만내는 깊이방향으로 왕복흐름을 재현시킬 수 있는가를 판단하기 위하여 조도를 맞추어 적용하였

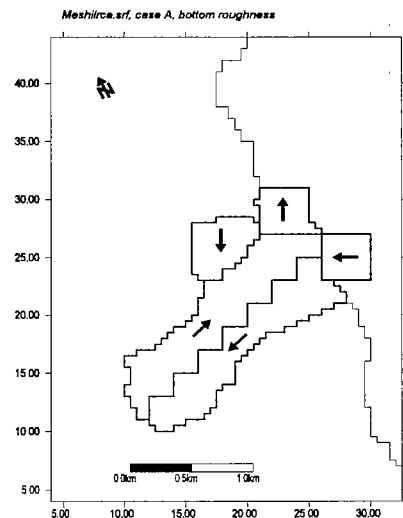


Fig. 4 Arrangement of artificial bottom roughness - Case A

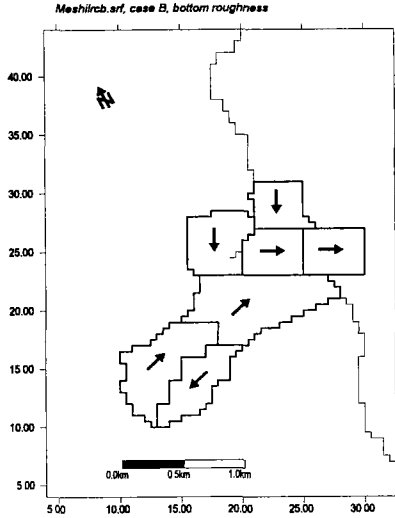


Fig. 5 Arrangement of artificial bottom roughness - Case B

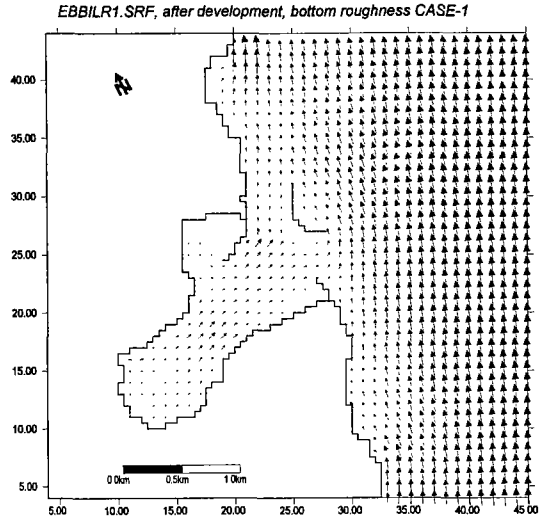


Fig. 6 Calculational result - Case A(max.ebb tide)

다. Case B는 방파제의 북쪽 외해쪽에서 해수를 유입시켜 남쪽 외 해쪽으로 해수가 유출되도록 시도하여 만내에 형성되는 조석잔차환류의 Scale은 만쪽과 같은 Scale의 환류들이 연이어서 발생한다고 생각되기 때문에 만쪽의 Scale의 순환이 이루어지도록 하였다. Case A 및 Case B에 대하여 구해진 해수유동 중 낙조시의 경우에 대해서 Fig. 6과 Fig. 7에 나타냈다. 개발 후에 있어서 저면조도를 도입한 경우와 도입하지 않은 경우 사이에는 유동장에서 세기와 방향에서 약간의 변화를 제외하고는 커다란 차이를 보이지 않았지만, 오염물 확산의 경우에는 이와 달리 나타났다.

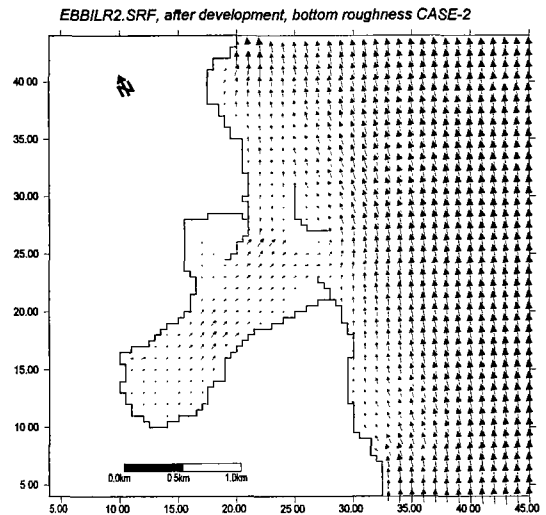


Fig. 7 Calculational result - Case B(max. ebb tide)

4.2 오염물 확산에 관한 평가

해수유동의 계산에서 얻어진 데이터와 고려되어진 Case A, B의 경우에 대해 오염확산 계산을 실시하였다. 계산조건은 이전의 연구와 동일하게 적용하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 조석 5주기 후와 조석 15주기 후의 수치시물레이션을 한 결과로 저면조도가

없는 경우(a), 저면조도가 있는 경우[Case A;(b), Case B;(c)]로 구분하여 실험한 결과이다.

Case A와 B의 경우, 내만의 오염물 농도가 저면조도를 적용하지 않은 경우와 비교해서 향상된 것을 알 수 있다. 저면조도를 달리 배치한 경우에 그 효과는 차이가 있었다. 이것은 저면조도의 배치시 대상해역에서 만 또는 폐쇄수역의 형상과 규모에

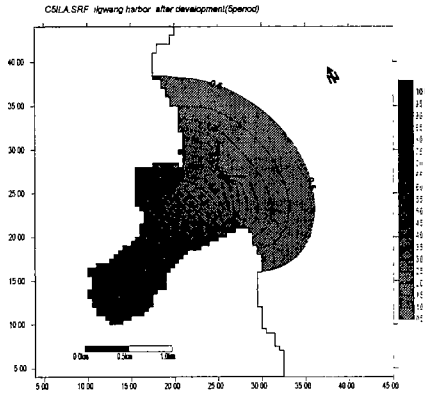


Fig. 8(a) Distribution of contaminant (after 5 tidal cycles)

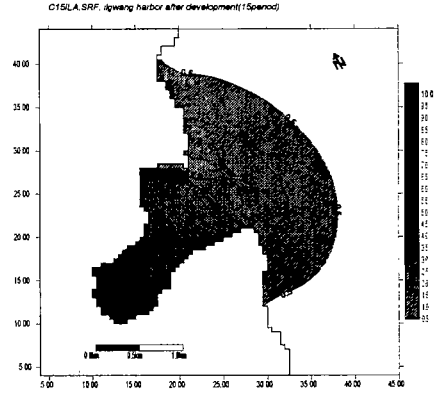


Fig. 9(a) Distribution of contaminant (after 15 tidal cycles) - after development

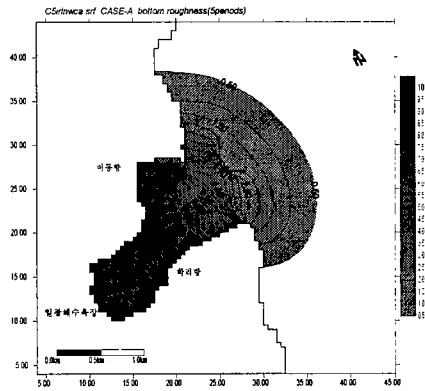


Fig. 8(b) Distribution of contaminant (after 5 tidal cycles) Case-A

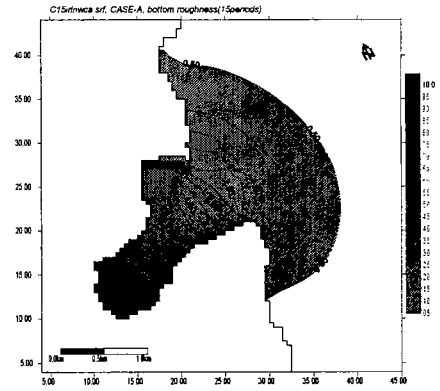


Fig. 9(b) Distribution of contaminant (after 15 tidal cycles) Case-A

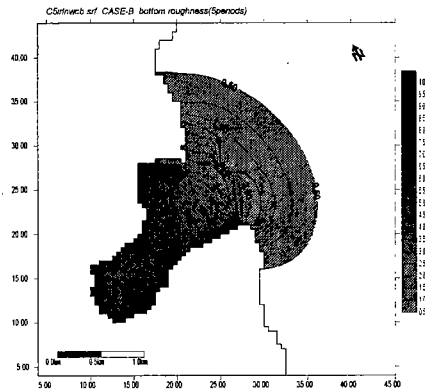


Fig. 8(c) Distribution of contaminant (after 5 tidal cycles) Case-B

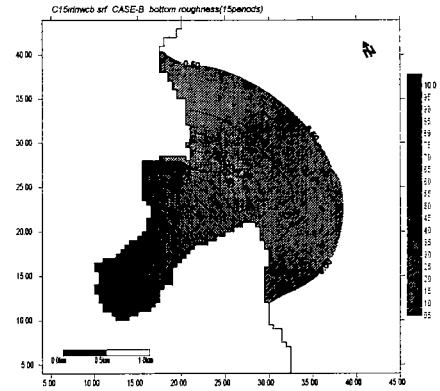


Fig. 9(c) Distribution of contaminant (after 15 tidal cycles) Case-B

따라 창조 및 낙조의 방향, 속도 크기의 변화, 조석 잔차류 등을 분석하여 이를 기초로 하여 배치할 때 순환을 증가시킬 수 있을 것으로 생각된다.

### 4.3 만내수의 체류에 관한 평가

오염물질의 잔류율에 대한 시간적 변화를 분석하기 위하여 저면조도를 설치한 두 가지 경우 및 항만개발 전후를 Fig. 10에 나타냈다. 이러한 결과들을 비교해 보면 비교적 초기단계에서 Case A의 경우는 유동장에 큰 변화를 가져오지 않아 잔류율의 개선효과가 별로 없었지만 5주기를 지남에 따라 다소 개선되는 경향을 나타내었다. Case B의 경우는 초기단계에서 잔류율이 만내수를 외해에서의 유입 또는 유출시키는 능력이 크지만 9주기에서 10주기를 지나면 외해에서의 유출이 적어지게 되어 잔류율의 감소율이 낮아지게 된다는 것이 확인된다. 15주기에 가까워지고 그 이후는 오히려 잔류율이 정체되는 것을 예상할 수 있다. 저면조도의 효율적인 배치나 또는 저항차를 높일 수 있는 형상을 가진 저면조도의 개발이 필요하다고 고려된다.

Case B의 경우는 상대적으로 만구부근과 내만 깊숙히 강한 저항차를 부여하여 폐쇄성 해역의 해

수교환을 촉진시켜 해수교환능력을 향상시켰다고 볼 수 있다. 즉, 폐쇄성 해역의 해수교환의 촉진에는 만구부의 해수교환능력과 만전체에 걸친 스케일의 순환류에 의해서 만내부의 해수를 만구부근에 운반하는 기능의 2가지가 필요하다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론 및 제언

본 연구에서는 항만개발 전·후에 대한 해수유동 및 오염물 확산 시뮬레이션을 하여 비교·분석하였으며, 오염이 가장 심한 항만내부에 오염물질을 배출시켜서 15조석주기 동안의 조석변동에 따른 오염확산을 실험하고 항만내에 잔류된 확산물질의 농도를 정량적으로 평가하였다.

수치 시뮬레이션을 통한 검토결과, 대상항만은 동해안의 특징인 조차가 작고 외해로 바로 개방되어 있으므로 만입된 해역에서는 조류가 미약하다. 따라서 일부 차폐된 해역에서는 흐름이 약하더라도 개방해역으로 쉽게 확산되어가는 것을 알 수 있었다. 그러나 항만개발 이후에는 수질개선을 위한 노력이 뒤따라야 한다는 것을 수치 시뮬레이션의 결과를 통하여 파악할 수 있었다. 특히, 대상항만에서 일광해수욕장이 내만으로 깊숙히 위치해 있기 때문에 해수순환의 제약을 극복하여 순환을 끌어올리기 위한 별도의 방법이 필요하다.

이에 따라 본 연구에서는 상술한 문제점을 극복하기 위한 방법으로 저면조도를 이용한 수질개선을 제안하였다. 이 방법에서는 먼저 저면조도에 의한 잔차류의 창조 및 제어가 해수교환 즉 수질 개선에 미치는 효과에 대하여 수치실험을 통하여 검증하였다.

의도한 바대로 방향특성을 가진 저면조도를 만내에 배치하는 것에 의해서 해수교환을 활발하게 촉진시키는 것이 가능하다는 것이 해수유동 및 오염물 확산 시뮬레이션을 통하여 확인되었다. 이것은 종래 공간적으로 일정하게 부여되었던 해저마

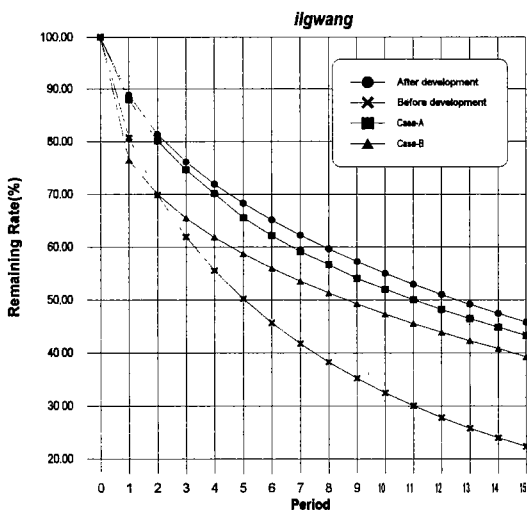


Fig. 10 Time series of remaining rate



찰계수의 공간적인 분포의 중요성을 시사하고 있는 것이기도 하다.

본 연구에 있어서 검토는 기존의 검증된 수치모델로써 비교적 복잡한 실제 항만을 대상으로 한 것이고, 확산시뮬레이션에 있어서는 성층현상의 영향이 없다는 가정하에 적용이 되었기 때문에 향후 3차원 시뮬레이션 및 성층의 영향을 포함시킨 검토를 행할 필요가 있다고 생각된다.

### 참고문헌

- 1)金子安雄,堀江祿,村上和男, : ADI法による潮流汚濁擴散の數値計算-大阪灣に適用した場合について-港灣技術研究報告, 第14卷 第1號, 1975. 3.
- 2) 이중우, 국승기 : 일광항의 항만개발에 따른 수질변화에 관한 연구, 한국항만학회, 제12권 2호, pp. 303-312. 1998.
- 3) Fisher et al. : Mixing in Inland and Coastal waters, Academic Press, 1979.
- 4) 부산광역시 : 제2종 어항(대변항외 2개항)시설사업 환경영향평가서(이동항, 학리항), 1997.
- 5) 국승기 : 폐쇄성 해역에 있어서의 새로운 수질개선책에 관한 연구, 한국항만학회, 제12권 1호, pp. 95-104. 1998.
- 6) 鷺見榮一, 橋間元徳 : 沿岸海域における海底摩擦係數の評價, 公害資源研究所彙報, 12(2), pp. 63-74, 1982.
- 7) 小松利光, 矢野眞一郎, 小橋乃子, 鞠承淇, 藤田和夫 : 流れの方向により抵抗特性の異なる人工粗度の開發, 水工學論文集, 41, pp. 705-710, 1997.
- 8) Komatsu et al. : On the Estimation of Dispersion Coefficient for 2-Dimensional Simulations in a Bay, Proc. of 9th APD-IAHR Cong., 3, pp. 345-352, 1994.