

## 해빈류하에서 해수유통로의 해수교환 효과 The Effect of Water Exchange Outlets under Wave-Induced Currents

이정렬\*, 주진규\*

Jung L. Lee and Jin Kyu Chu

### 1. 서론

유조선의 빈번한 왕래로 발생하는 원유의 누출사고, 무절제한 해안환경 파괴 및 생활하수, 공장폐수의 방류 문제가 최근 대중매체를 통하여 빠짐없이 보도되고 있으며 또 그로 인하여 양식장, 바다낚시, 해수욕장 등 생산 및 생활 환경이 오염되어 일반인들도 직접 간접으로 적지 않게 피해를 입게 되므로 그에 대한 관심이 날로 증가되고 있다. 동해 어항의 경우는 수산물 가공폐수외에 주변에 주거지 및 상가(횃집)등이 위치하여 생활오수 등이 다량 발생하고 있다. 이들 해양오염은 순식간에 널리 확산되므로 수산자원과 연안 양식장에 막대한 피해를 입히고 해수욕장 등의 해안 휴식공간과 자연경관을 훼손하게 된다. 그러나 많은 나라가 저마다 빠른 경제 성장에 온 정열을 쏟는 통에 상당한 양의 오염물질이 인간의 산업활동이나 자연적인 경로를 통하여 해양 환경으로 유입되는 데 따른 장기적 손실에는 무관심하다. 특히 항은 항구를 제외하고는 외해와 폐쇄되므로 흐름이 차단되어 일단 유입된 오염물질은 좀처럼 자연 정화되지 못하고 항내 수질 악화를 초래하며 궁극적으로는 주변 환경을 해치는 주범으로 처치 불가능한 존재로 전락하므로써 입는 손실은 이루 말할 수 없게 된다. 따라서 최근 항만 건설시 해수유통로의 설치가 권장되고 있으나 그 설치에 따른 효과가 어느 정도인지는 현장 관측이나 수치 실험을 통해서도 파악하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 해수유통로의 설치에 따른 항내 수질 향상의 정도를 수치실험할 수 있는 모형을 개발하며 이의 효과를 살펴본다. 수질오염 물질이 항내에 유입되었을 때 주 관심 사항은 그 물질이 얼마나 빨리 항외로 빠져나가느냐 하는 것이다. 오염물질은 바람이나 파랑, 조류, 해류 등과 같은 해양 환경에 따라 이동되고 확산되므로 이를 정확하게 예측하기 위해서는 흐름에 대한 충분한 예측 기술이 요망된다. 본 과제에서는 해수유통로가 파랑 작용이 우월한 동해에 설치되었을 경우 생성되는 해빈류로 인하여 항내의 오염원이 어떻게 움직이고 얼마나 확산되는 지를 해수교환의 차원에서 분석하였다.

### 2. 해수 유통로를 통한 이송 및 확산

수평 성분 유속과 확산 계수의 수직적 변화가 없다면 오염물질 전송모델의 지배 방정식은 평균 농도  $C$ 로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left( hK_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left( hK_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서  $u$ 와  $v$ 는 해빈류 모형으로부터 산정되는 각각  $x$ 방향과  $y$ 방향의 유속이며  $K_x$ 와  $K_y$ 도 각각  $x$ 방향과  $y$ 방향의 확산 계수이다. 항내 수질 개선을 위하여 설치 되는 해수 유통로의 효과를 검토하기 위하여 다음과 같이 해수 유통로를 통하여 단위 시간당 이송 및 확산되는 오염물질의 양을 산정한다.

\* 성균관대학교 토목환경공학과 (Dept. of Civil and Env. Eng., Sungkyunkwan Univ.)

이송에 의하여 단위시간당 전송되는 양  $M_a$ 와 확산에 의하여 단위시간당 전송되는 양  $M_d$ 은 다음과 같이 산정된다.

$$M_a = CQ, \quad M_d = AK \frac{AC}{L} \quad (2)$$

여기서  $A$ 는 해수유통로의 단면적이고  $L$ 은 해수유통로의 길이이다. 그리고  $Q$ 는 해수유통로를 통한 유량으로 다음과 같이 산정된다.

정상상태라 가정하고 길이  $L$ 의 해수유통로 양단의 수위의 차가  $\Delta\eta$ 인 경우 직경  $d$ 의 원형 해수 유통로를 통한 유량은 다음 Manning의 경험 공식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$Q = \frac{0.312d^{8/3}}{n} \left( \frac{\Delta\eta}{L} \right)^{1/2} \quad (3)$$

여기서  $n$ 은 Manning의 조도계수로서 0.013을 사용하였다. 따라서 양단에서 높은 수위에서는 계산된 유량이 해수유통로를 통하여 유출되고 낮은 수위에서는 그 유량이 유입되는 것으로 본다.

확산에 의한 전송 양은 Fick's first law에 의하여 유도된 것이다. 일단 이렇게 산정된 값으로부터 해수 유통로 양단에서의 농도는 다음과 같이 보정된다.

$$C' = C + \frac{(M_a + M_d) \times \Delta t}{V} \quad (4)$$

여기서  $V$ 는 해당 격자의 체적으로  $\Delta x \Delta y h$ 가 된다.  $Q$ 는 수위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르므로  $M_a$ 의 값은 수위가 높은 격자에서 '-' 값, 수위가 낮은 곳에서 '+' 값을 갖는다. 확산은 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 일어나므로  $M_d$ 의 값은 농도가 높은 격자에서 '-' 값, 농도가 낮은 곳에서 '+' 값을 갖는다.

본 과제에서 이송 및 확산 방정식의 수치해석은 fractional step method에 의해서 이(1998)에 의하여 제안된 방법을 따른다. 이(1998)의 방법은 이송(advection)이 우월한 흐름 또는 확산 계수가 적은 영역에서 수치확산(numerical diffusion)을 제거하는 방법으로 오염발생 영역이 넓고 확산 거동이 적으며 흐름의 영향력이 우세한 경우에 적용성이 우수하다. 확산단계 수치해석법은 해수 순환 모형의 확산단계 수치 해석법과 동일하게 ADI(Alternating Direction Implicit) 방법으로 수치계산된다.

### 3. 해빈류 예측 모델

포물선형 모형으로부터 산정된 파랑의 잉여에너지는 다음 수직적분된 연속방정식과 운동방정식의 외력으로 작용하여 연안역에서 해빈류를 일으킨다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( Q_x + \frac{M_x}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Q_y + \frac{M_y}{\rho} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{Q_x^2}{h + \eta} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{Q_x Q_y}{h + \eta} \right] + \frac{\partial S_{xx}}{\rho \partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\rho \partial y} - f Q_y$$

$$+g(h+\eta)\frac{\partial\eta}{\partial x}-\frac{\tau_{wx}}{\rho}+\frac{\tau_{Bx}}{\rho}=\frac{\partial}{\partial x}D_x\frac{\partial Q_x}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}D_y\frac{\partial Q_x}{\partial y} \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{Q_x Q_y}{h+\eta}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{Q_y^2}{h+\eta}\right]+\frac{\partial S_{xy}}{\rho\partial x}+\frac{\partial S_{yy}}{\rho\partial y}+fQ_x$$

$$+g(h+\eta)\frac{\partial\eta}{\partial y}-\frac{\tau_{wy}}{\rho}+\frac{\tau_{By}}{\rho}=\frac{\partial}{\partial x}D_x\frac{\partial Q_y}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}D_y\frac{\partial Q_y}{\partial y} \quad (7)$$

여기서,  $Q_x = \int_{-h}^{\eta} u dz$ ,  $Q_y = \int_{-h}^{\eta} v dz$ ,  $M_x = \frac{E \cos \theta}{C}$ , 그리고  $M_y = \frac{E \sin \theta}{C}$

이며,  $\eta$ 는 평균수면,  $E$ 는 파랑 에너지,  $\theta$ 는 파향이다. 쇄파대 내에서 발생하는 파꼭아래의 해향저류(undertow) 현상은 질량이송(mass flux)( $M_x, M_y$ )에 의하여 물리적으로 해석되는데 Phillips(1969)에 의하면 질량이송은 파랑 운동에 따라 파꼭과 파봉 사이에서 일어나는 흐름으로 쇄파대 내에서 이를 만회하기 위한 흐름이 파꼭아래에서 형성된다고 할 수 있다. 이러한 질량이송을 고려하므로 계산되는  $Q_x, Q_y$ 는 해향저류(undertow)의 수심적분된 유량이 되고 토사이동 모델에서 연안 사주(longshore bar)를 형성하는 데 기여한다. 따라서 파랑에 의한 질량수송을 포함한 전 수심의 평균 유량은 질량이송과 수심적분된 유량을 합하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{Q_x} = \left( Q_x + \frac{M_x}{\rho g} \right), \quad \overline{Q_y} = \left( Q_y + \frac{M_y}{\rho g} \right) \quad (8)$$

해빈류의 지배방정식 (5-7)은 fractional step method에 의해 수치해석되었다(Lee, 1994). 파랑 모델로부터 각 격자점마다 산정된 잉여응력과 질량이송 하에서 시간적으로 변화하며 수렴하는 평균 해수위 및 연안류를 계산하기 위해서는 적절한 초기조건 및 경계조건을 필요로 하는 데 여기서는 해수유통로에 따른 부분 투과 경계 조건에 대하여만 설명한다. 육지경계면은 staggered grid system상 유속 벡터가 위치하는 곳이므로 해수유통로가 위치한 양단 격자에서 수위차에 따른 다음 유량을 적용한다.

#### 4. 해수교환율과 항만길이

확산 현상에 의한 해수 교환율은 항만에 일정 농도를 초기에 주었을 때 시간에 따른 항내 평균 농도의 변화로부터 산정할 수 있는데 Fick's first law를 이용하여 해수 교환율에 대한 근사식을 구하면 다음과 같이 된다.

$$\text{해수 교환율} = 1 - \exp\left(-\frac{4Kt}{L_p^2}\right) \quad (9)$$

여기서  $L_p$ 는 항만길이(port length)로 본 연구에서는 해수유통로의 효과를 식 (9)의 항만길이의 변화 정도로 표현한다. 즉, 본 연구에서는 식 (9)의 항만길이를 변화시켜 수치모의 결과를 잘 따르는 값을 선정하여 항만의 해수교환능력을 평가한다. 그 길이의 차가 크면 해수교환능력에 미치는 효과가 크고 차가 작으면 해수교환능력에 미치는 효과가 적다고 볼 수 있다. 흐름이나 해수유통로가 없는 경우 일반적으로 정방형의 항만은 다음과 같이 근사적으

로 항만길이를 구할 수 있다.

$$L_p = \sqrt{\frac{2L^2B}{b}} \quad (10)$$

## 5. 수치 결과

확산 현상에 의한 해수교환은 확산계수와 비례관계를 그리고 항만길리와 반비례관계를 갖는 데 난류확산이 원활한 동해 해역에서 Fig. 1에 도시된 D 항만은 항만길이가 비교적 짧아 1km 정도이므로 확산으로 인한 해수교환이 원활하리라 예상된다. 식 (10)으로부터 얻은 식의 항만 길이를 좀더 분명히 확인하기 위하여 그리고 해빈류 및 해수유통로의 유무에 따른 효과를 파악하기 위하여 수치 실험이 수행되었다.

해수 교환율을 이송 및 확산 모형으로부터 산정하기 위하여 Fig. 2와 같이 초기에 일정 농도를 항내에 부하하였다. 시간에 따라 이 항내 농도는 확산되며 식 (9)와 같이 해수교환율을 얻는다. Fig. 3는 항내에 초기농도 부하 후 각각 24시간 후에  $x$ 방향과  $y$ 방향에 대하여 동일한 확산계수  $K=1$ 과  $5 \text{ m}^2/\text{sec}$ 에 대한 공간적 초기농도백분율을 보여주고 있다. Fig. 4은 해수유통로를 고려하고 수치계산된 확산계수  $K=1$ 과  $5 \text{ m}^2/\text{sec}$ 에 대한 공간적 초기농도백분율을 보여주고 있다. Fig. 5는 수치모형으로부터 산정한 시간에 따른 해수교환율을 이론식과 비교한 것을 도시한 것으로 해수유통로의 유무에 대하여 항만길이는 각각 810과 1030m 정도를 얻었다.

해빈류(wave-induced current)라하면 보통 파랑에 의하여 생성된 흐름을 일반적으로 일컫는 데 본 연구에서는 해빈류를 수심평균된 흐름으로 정의하며 일반적으로 파곡아래 바다를 향하는 흐름을 일컫는 (해향)저류를 본 연구에서는 파곡아래의 흐름을 평균한 흐름으로 정의하고 적용하였다. 다음은 저류하에서 해수유통로의 유무에 따른 해수교환의 효과를 살펴보았다. 실제로는 저류의 강도에 따라서 공간적으로 확산 계수가 변하지만 편의상 일정한 것으로 가정하였다. 그리고 해수유통로가 아래에 위치하므로 저류에 의하여 지배받는 것으로 보고 저류에 따른 해수교환율의 변화를 조사하였다. Fig. 6은 저류하에서 해수유통로가 없는 경우 그리고 Fig. 7은 해수유통로가 있는 경우의 24시간 후 초기농도 백분율을 보이고 있다. 해빈류가 해수교환에 미치는 영향이 큰 이유는 파랑 작용으로 방파제 양단의 수위차이가 생기며 이로 인하여 해수유통로를 통한 흐름이 발생하고 이 흐름과 함께 오염물질이 계속 항외로 배출되기 때문이다. 따라서 해빈류와 같은 국지적인 흐름이 빈번한 동해에 설치하였을 경우 그 해수교환 효과가 더 두드러지게 나타날 것으로 판단된다. Fig. 8은 수치모형으로부터 산정한 시간에 따른 해수교환율을 이론식과 비교한 것을 도시한 것으로 해수유통로의 유무에 대하여 항만길이는 각각 810과 1030m 정도를 얻었다.

## 6. 결론

이송에 의하여 해수유통로를 통한 단위시간당 전송되는 오염물질의 양과 확산에 의하여 단위 시간당 전송되는 양을 Manning의 유량공식과 Fick's first law을 이용하여 산정하였으며 이로 인한 항내오염물질의 배출을 포물선형 파랑모델과 해빈류모델, 오염물질 전송모델을 이용하여 수치모의 하였다. 본 연구에서 개발된 수치 모델에 의하면 해빈류가 없을 경우 항만자정능력을 평가하는 특성 길이로서 '항만길이'는 해수유통로의 유무에 대하여 각각 810과 1030m 정도이고 4m의 심해 파랑에 의한 어항 주변의 해빈류에 의하여 오염된 항내 해수의 상당량이 방출됨을 알 수 있으며 항만길이는 해수유통로의 유무에 대하여 각각 400과 1015m 정도로 해수유통로가 있는 경우

급격히 감소하였다. 항만길이가 짧게 산정될수록 항만자정능력이 향상됨을 의미한다. 따라서 해수유통로는 방파제 양단의 수위차이로 인한 오염물질의 이송을 일으켜 해빈류와 같은 국지적인 흐름이 빈번한 동해에 설치하였을 경우 그 해수교환 효과가 더 두드러지게 나타날 것으로 판단된다. 그러나 이러한 흐름은 또한 항구를 통하여 부유사를 항내로 끌어들여 침전시키는 역할을 할 수 있으므로 항내매물에 대한 평가도 병행하여야 할 것이다.

**참고문헌**

Lee, J.L., 1994. Quasi-3D wave-induced circulation model, *J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 6(4):459-471.  
 이정렬 (1998), 전방추적법에 의한 오염물질의 전송모델, *한국해양·해양공학회지*, 10(1): 37-44.  
 Phillips, O.M., 1969. *The dynamics of the upper ocean*, Cambridge University Press, Cambridge.

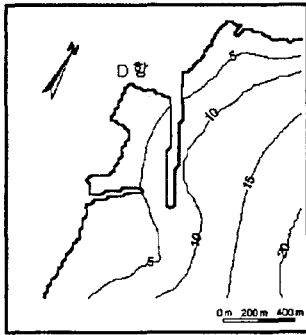


Fig. 1 Depth contours.

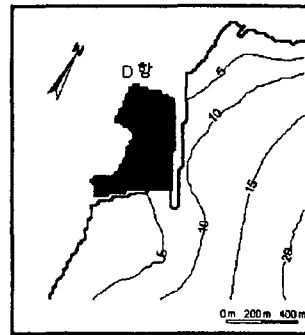


Fig.2 Area of initial release.

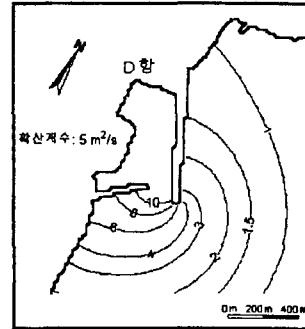
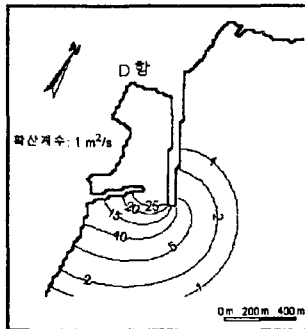


Fig 3. Concentration contours after 24hrs without outlets:  
 a)  $K=1$  (b)  $K=5 \text{ m}^2/\text{s}$ .

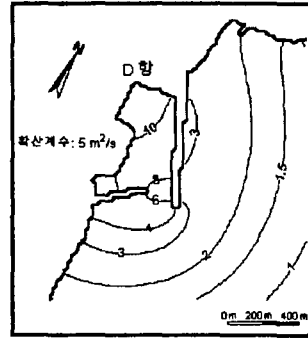
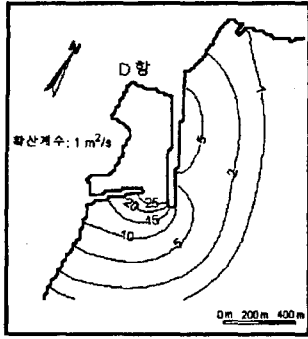


Fig 4. Concentration contours after 24hrs with outlets:  
a)  $K=1$  (b)  $K=5 \text{ m}^2/\text{s}$ .

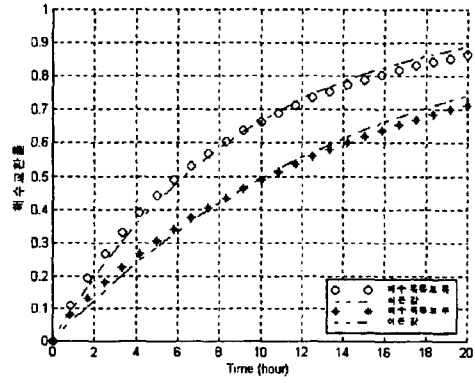
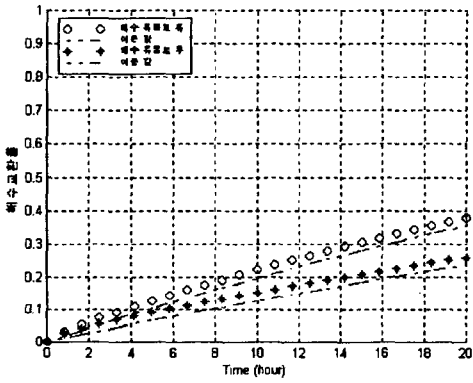


Fig 5. Temporal variations of water exchange ratios: a)  $K=1$  (b)  $K=5 \text{ m}^2/\text{s}$ .

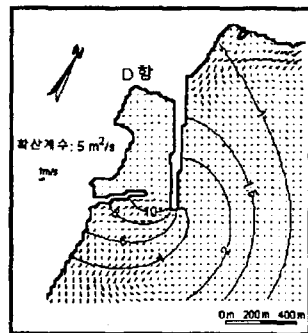
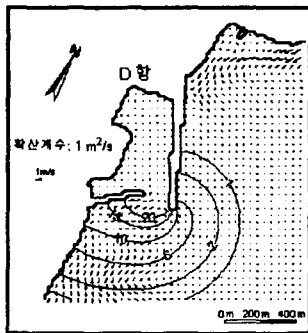


Fig 6. Concentration contours after 24hrs without outlets under wave-induced currents: a)  $K=1$  (b)  $K=5 \text{ m}^2/\text{s}$ .

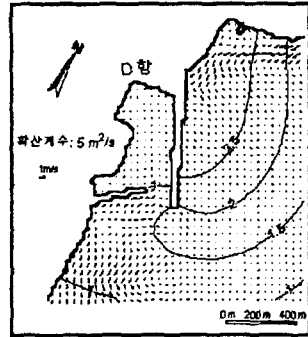
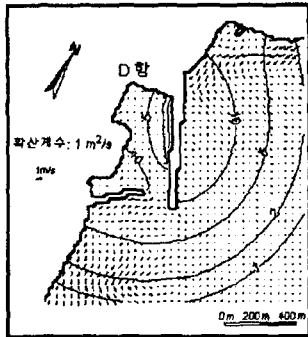


Fig 7. Concentration contours after 24hrs with outlets under wave-induced currents: a)  $K=1$  (b)  $K=5 \text{ m}^2/\text{s}$ .

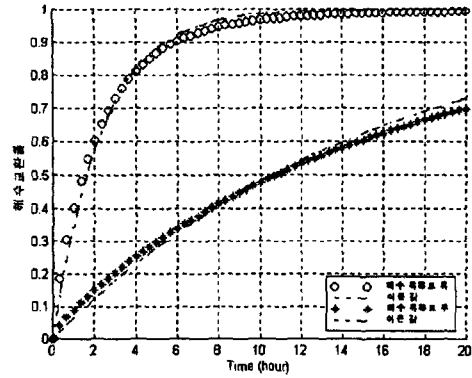
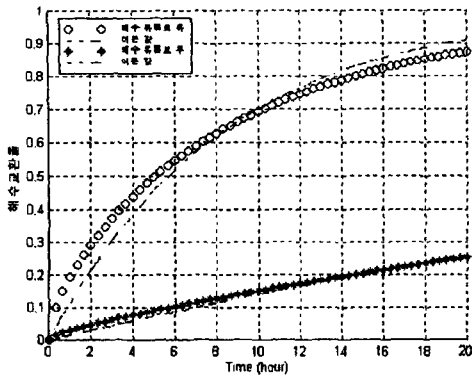


Fig 8. Temporal variations of water exchange ratios: a)  $K=1$  (b)  $K=5 \text{ m}^2/\text{s}$ .