

小內灣의 海水交換率

박 병 수 · 류 청 로*

경상대학교, 해양산업연구소 · 부경대학교*

(1997년 7월 22일 접수)

Seawater Exchange Ratio in Small Bay

Byung-Soo Park and Cheong-Ro Ryu*

Gyeongsang National University, Institute of Marine Industry · Pukyong National University*

(Received July, 22, 1997)

Abstract

To understand seawater exchange are important to analyze the formation of watermass, material circulation and transfer of pollutant material etc. The purpose of this study is to review the previous studies and to propose new exchange ratio.

$$\gamma = \frac{V_o}{V_2} = \frac{(C_2 - C_1)}{(C_o - C_1)}$$

where,

C_1 ; average salinity of the water at low water

C_2 ; average salinity of the water at the next low water

C_o ; average salinity of the water passing the bay mouth on the flood tide

V_2 ; total water volume of the bay on the low water

V_o ; the volume of the remaining outer bay water entering during the flood tide

Seawater exchange ratio of Dongho Bay calculated by new method are 26.1%, 23.8% respectively.

The average fresh water residence ratio calculated by equation (12) is 2.2 days, that is corresponding 23.5 % of exchange ratio. Thus, it appears similar result as proposed exchange ratio.

서 론

대상으로 하는 해역의 해수가 어떻게 교체하는가 또 그 교체속도는 어느 정도인가 등의 해수교환의 문제는 수피의 형성, 생물을 포함한 물질순환, 해양오염 등에 있어 대단히 중요하다.

해수교환은 내만의 물질수지를 지배하는 중요

한 요인의 하나로서 여러 사람에 의해 많은 연구가 행해져왔지만 해수교환이라는 용어는 사용하는 사람에 따라 의미가 달라지는 경우가 많았다. 본 연구에서는 해수교환의 기존연구를 검토하고 소내만에서의 새로운 해수교환율의 산정방법을 제시하고자 하였다.

이류와 분산의 구조를 밝혀 물질수송의 실태를

해명하려는 방식은 이른바, Euler적 또는 미분적인 방법이라고 말할 수 있다. 이것에 대하여 어느 만의 해수가 교체되는데 어느 정도의 시간이 걸릴까. 육지로 부터 오염물질의 투입을 어느 정도 감소하면, 만내의 평균적인 수질은 어느 정도 개선될까하는 의문이 종종 제기되었다.

이러한 의문에 대하여 Euler적 방법에 의하면, 만전체의 물질수송에 관한 수치모형실험을 행하여 평균농도의 변화를 구하는 상당한 노력이 필요하다. 그러나 만전체의 해수의 교환 정도와 물질의 체류시간이라 부르는 Lagrange적, 적분적인 수치를 명확히 알면, 이러한 문제의 해결이 쉬워진다. 또 진해만과 평양만은 어느 곳이 오염되기 쉬운가 하는 지리적으로 떨어진 만끼리의 특성을 비교할 때에도 만전체의 해수교환을 또는 만내수의 체류시간이라는 수치를 사용하면, 비교가 용이해지는 이점이 있다.

기존의 연구

1. 해협근방의 해수교환율

1-1. Euler적인 방법

만구를 통한 해수교환은 여러 교환기구가 작용하여 나타나는데 그 교환의 정도를 하나의 수치로 표현하면 편리하다. 해수교환율, 조석교환율이라 부르는 것이 그 예로 여러 가지가 제안되어 있는데 서로 내용이 조금씩 다르다.

그러나, 기본적으로는 만구를 사이에 두고 만내외의 물이 1조석주기 동안에 교환한 해수량 q_{EX} 가 만구를 한방향으로 통과한 전해수량 중에 점하는 비율로 표시한다. 통과한 전수량으로서 여기서는 밀물 때의 유입량(Q_F , Tidal Prism)을 이용한다.

그러므로, 교환율은 $\gamma = q_{EX}/Q_F$ 로 정의한다.

Q_F 대신으로 썰물 때의 유출량 Q_E 을 이용하기도 한다. 1조석주기 동안의 만내의 담수공급량을 Q_R 로 하면, 定常의 경우 $Q_E = Q_F + Q_R$ 이다.

후자의 교환율은 $q_{EX}/Q_E = \gamma/(1+Q_R/Q_F)$ 가 되는데 이것이 교환되는 것으로 하면, 교환에 의한 만내 염분수송량은 $q_{EX}(C_O - C_B)$ 가 되고, 定常인 경우에 총 염분수송량은 0이 되어 1조석주기를 생각

하면, $q_{EX}(C_O - C_B) = Q_R C_A$ 가 된다. 여기서 C_A 는 1조석주기 동안의 단면평균 염분농도이다. 통상의 경우 $Q_R \ll Q_F$ 이므로 2개의 교환율에는 큰 차이가 없다.

지금 만내수와 만외수를 대표하는 염분농도를 각각 C_B 와 C_O 라 하고, 만구단면에 있어서 밀물과 썰물 때의 평균염분농도를 각각 C_F 와 C_E 이라 하면

$$C_A = (Q_F C_F + Q_E C_E) / (Q_F + Q_E) \text{ 이고}$$

$$\gamma_R = \frac{q_{EX}}{Q_F} = \frac{Q_R}{Q_F} \frac{C_A}{C_O - C_B} = \frac{2}{1 + C_E/C_F} \frac{(C_F - C_E)}{C_O - C_B} \quad (1)$$

C_F 와 C_E 의 차이가 작을 때에는 $\gamma_R = (C_F - C_E)/(C_O - C_B)$ 가 된다.

이렇게 하여 만구단면에서의 1조석주기 동안의 흐름과 염분의 연속관측을 실시하여, C_F 와 C_E 를 구하고 C_B 와 C_O 를 정하여 교환율 γ_R 을 구한다.

C_B 와 C_O 를 결정하는 방법은 임의성이 있고, 그에 따라 교환율의 수치가 다르므로, 어떠한 C_B 와 C_O 를 사용할지 유의할 필요가 있다. 만구부근의 교환의 입장으로는 만구로 부터 양측에 각각 1조석유정만큼 떨어진 장소의 염분농도를 사용하는 것이 하나의 방법이고, 만전체의 해수교환의 입장에서는 염분분포를 고려하여 만전체의 대표치를 정할 필요가 있다.

위와는 약간 다르지만 자주 사용되는 교환율이 있다. 즉, 밀물 때 만내에 유입한 해수량 Q_F 의 중에서 처음으로 만내에 들어오는 외양수의 양 q_s 가 점하는 비율 $\gamma_p = q_s / Q_F$ 로 교환율을 정의한다. 그래서 밀물에 의한 유입량 Q_F 는 이 외양수량 q_s 와 만으로부터 밖으로 나갔다 밀물 때 다시 만내에 되돌아오는 해수량 q_E 로 이루어지는 것으로 한다. 따라서 $q_E = Q_F - q_s = Q_F(1 - \gamma_p)$ 이다. 또 q_s 는 외양수의 염분농도 C_s 를, q_E 는 앞의 썰물 때의 평균농도 C_E 를 갖는 것으로 한다. 밀물 때의 평균염분농도 C_F 를 이용하면,

$$Q_F C_F = q_s C_s + q_E C_E = \gamma_p Q_F C_s + Q_F(1 - \gamma_p) C_E = Q_F(C_E + \gamma_p(C_s - C_E)) \text{가 되어}$$

$$\gamma_p = \frac{q_s}{Q_F} = \frac{(C_F - C_E)}{(C_O - C_E)} \quad (2)$$

을 얻는다. 위의 식이 Parker 등(1972)이 유도

한 식이다. $C_s > C_2 > C_E > C_1$ 이고, $C_s = C_2$ 의 경우를 생각하면 γ_P 는 γ_R 의 값보다 일반적으로 커진다. qs의 중에서는 교환에 관여하지 않고 그대로 외해로 돌아가는 것이 포함되어 있어 qs는 교환량 q_{EX} 와는 같지 않다. 그러므로 $qs > q_{EX}$ 가 되고, γ_P 는 γ_R 보다 커지는 것이다.

한편, 柏井은 Parker의 방법을 확장하여 다음의 2개의 교환율을 추가하였다. 그 중의 하나는 유출수 중에서 처음으로 만외로 나간 만내수 q_B 가 접하는 비율은

$$\gamma_F = \frac{q_B}{Q_E} = \frac{(C_F - C_E)}{(C_F - C_B)} \quad \text{이다.} \quad (3)$$

그리고, 만외수와 만내수가 직접 교환하는 경우의 교환율은

$$\gamma_G = \frac{q_{EX}}{Q_E} = \frac{(C_F - C_E)}{(C_O - C_B)} \quad \text{이다.} \quad (4)$$

1-2. Lagrange적인 방법

해수교환의 기구를 상세히 아는 것은 지금까지와 같이 고정된 장소에 있어서 흐름과 물질농도의 변화를 조사하는 Euler방법보다, 개개의 물질입자를 추적하여 그 행동을 보는Lagrange방법이 간편하다.

현장에서 다수의 Float 를 흘려 1조석주기후에 만내에 남는 Float의 수에 기초하여 해수교환율을 구하는 방법이다. 그러나 현장실험은 수많은 곤란이 있어 충분한 정도로 쉽게 얻기 힘들다. 이것을 보완하기 위해 재현성이 우수한 수치실험과 수리 모형실험을 행하여 해수입자를 추적하고, 그 결과를 사용하여 해수교환율을 구한다.

만구단면을 사이에 두고 내측에 만내수립자, 외측에 만외수립자가 총만되어있는 경우를 생각하자. 예를 들어 밀물의 최강류시로부터 각 입자의 추적을 시작하여 1조석주기의 계산을 행하고, 1주기후에 만내에 남는 만외수의 양을 q_r 이라 한다. 또 이 기간내에서 만외수가 만내에 가장 많이 존재하고 있을 때의 양을 Q_{max} 로 한다. 그러면 양자의 비로 해수교환율 $\gamma_K = q_r/Q_{max}$ 을 정의 한다.

그러나 이렇게 하여 구한 교환율은 γ_R 등에 비해

상당히 큰 값이 된다. γ_K 의 내용은 만구부근의 1조석유정내의 교환을 대상으로 하는 것에 유의할 필요가 있다. 입자의 추적을 2조석주기, 3조석주기 계속하면 교환되는 만외수량은 차차 감소할 것이다. 만내수에 대하여도 같다. 그러므로 γ_K 의 값이 커도, 만전체의 교환이 반드시 크다고 할 수 없다.

그리고, 담수공급효과를 포함하여 定常이 될 때까지 시뮬레이션을 행하여야 만전체의 교환으로 생각할 수 있다. 한편, γ_R 는 1조석주기내의 관측결과를 기초로 하고 있어도, 장기간의 교환과정에 유래하는 염분분포를 고려하고 있기 때문에, 만전체의 해수교환에 관한 것이고 γ_K 와 내용을 달리 한다.현장의 Float추적에 의해 구한 해수교환율도 γ_K 와 같은 성격을 갖고 있다.

2. 내만 전체의 해수교환율

2-1. Box Model

만전체의 해수교환의 강도를 구하는 다른 수법으로서 Box model의 방법이 있다. 이것은 해양요소의 분포를 알고 있을 때, 해수교환의 기구에 들어가지않고, 단순히 물질의 연속조건으로부터 해수교환의 정도를 파악하는 것으로 간편하기 때문에 많이 이용되어 왔다. 지금 가장 단순한 경우를 생각해.용적 V_1 , 평균염분 C_1 의 내만이 평균염분 C_2 의 외해와 접해있다(Fig.1).

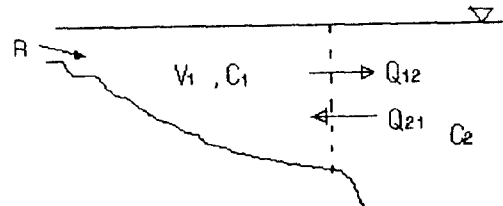


Fig.1. Schematic view representing of Box Model.

시간단위로서 조석주기보다 훨씬 긴 기간(예 1개월)을 생각한다.

단위시간당의 내만으로부터 외해로의 물질수송량을 $Q_{12}C_1$, 외해에서 내만으로의 물질수송량을

$Q_{21}C_2$ 로 하면, 물질의 연속조건은 $V_1 dC_1/dt = Q_{21}C_2 - Q_{12}C_1$ 이다.

Q_{12} 는 전방수송계수, Q_{21} 는 후방수송계수라 하고, 모두 正의 값이다. 흐름에 관하여 定常이라 하면 단위시간당의 담수공급량을 Q_r 이라할 때 $Q_r = Q_{12} - Q_{21}$ 이다. 그러므로 C_1, C_2, Q_r 을 알면 수송계수 Q_{12} 와 Q_{21} 를 정할 수 있다.

조차가 클 때 해수교환이 크다고 일반적으로 생각하고 있는데, 조류이외의 순환류의 기여가 클 경우에는 반드시 그렇지 않다. 해수교환의 강도는 계절에 따라 현저히 다르고 연변화의 양상도 만에 따라 다르다. 그리고 이러한 현저관측은 제한과 곤란이 많고, 상당한 오차를 포함하고 있는 것을 염두에 둘 필요가 있다. 해수교환은 어느 해역에서도 여름철에 강하고, 겨울철에 약하다. 여름철에는 밀도류에 의한 연직순환이 쉽고 같은 바람에서도 성층기에 강한 흐름이 생긴다.

한편, 겨울철에는 만구부의 해양 Front가 발생하여 내외수의 교환을 방해하기 때문에 여름철에는 겨울철에 비해 해수교환이 커진다. 단, 성층기의 단층 Model의 적용은 외견상 큰 해수교환을 초래할 가능성이 있어 검토가 필요하다. 부영양화 현상과 관련하여 Box Model은 영양물질의 수지의 검토에 많이 이용된다.

2-2. 잔여함수와 평균체류시간

만내에 공급된 물질이 만외로 나가고 교환되는 데는 얼마의 시간을 걸릴까. 이에 관한 시간스케일로서 지금까지 여러 제안이 있는데 그 의미는 명확치 않고 혼란을 보여왔다. 武岡은 이제까지 비교적 애매하였던 체류시간과 치환시간 등의 교환에 관련된 개념을 명확히 하였는데 그 내용은 다음과 같다.

1) 해역에 존재하는 물질의 평균체류시간

정상, 비정상을 불문하고 어느 시각에 해역에 존재 또는 공급되는 대상물질이 그 후 해역의 바깥으로 나가는데 필요한 시간의 평균치를 체류시간 τ_r 라 정의한다.

지금 시각 $t=0$ 에 해역내에 질량 M_0 의 물질이 있다고 하고, 시각 t 에는 그것이 만내에 $M(t)$ 만큼 남아있다고 한다. $r(t) = M(t)/M_0$ 를 잔여함수라 하

고 확률분포함수의 일종으로 $r(0) = 1, r(\infty) = 0$ 의 성질을 가진다.

그런데 시각 t 에 해역에 나가는 물질량은 단위 시간당 $-dM(t)/dt$ 이다. 武岡은 어떤 시각($t=0$)에 해역에 존재하는 물질입자가 해역으로부터 나가는데 걸리는 시간을 그 물질의 체류시간이라 정의하였다. 즉,

$$\Phi(\tau) = -M_0^{-1} dM/d\tau = -dy/d\tau \quad (5)$$

$$\int_0^{\infty} \Phi(\tau) d\tau = 1, \phi(\infty) = 0 \quad (6)$$

으로 정의되는 함수 $\Phi(\tau)$ 는 체류시간 τ 을 갖는 물질입자의 비율로 나타내어 체류분포함수라 명명하였다.

$$\tau_r = \int_0^{\infty} \tau \Phi(\tau) d\tau = - \int_0^{\infty} \tau \cdot dy/d\tau \cdot d\tau = \int_0^{\infty} \gamma(\tau) d\tau \quad (7)$$

따라서 잔여함수를 알면 평균체류시간을 구할 수 있다.

2) 유입물질의 평균체류시간

해역에 단위시간당 G 의 물질이 유입되어 정상 상태가 되면 유출량도 단위시간당 G 가 된다. 해역내의 물질의 총량을 M_0 이라 한다. 이 경우에 해역내에 있는 물질의 연령조성을 생각하면 물질의 연령이란 대상물질이 해역내에 들어온 후의 시간을 표시한다. ($\xi \sim \xi + d\xi$)의 연령을 갖는 물질의 비율을 $\beta(\xi)d\xi$ 라 하면 다음의 관계가 된다.

$$\int_0^{\infty} \beta(\xi) d\xi = 1, \beta(0) = G/M_0, \beta(\infty) = 0 \quad (8)$$

따라서 연령 ξ 를 갖는 물질입자가 단위시간에 해역외로 나가는 양은

$$-M_0 d\beta(\xi)/d\xi \text{로 표시한다.}$$

$$\tau_r = \frac{1}{G} \int_0^{\infty} \xi (-M_0 \frac{d\beta}{d\xi}) d\xi = \frac{M_0}{G} \int_0^{\infty} \beta d\xi = \frac{M_0}{G} \quad (9)$$

윗 식은 해역을 나가는 물질의 평균연령을 나타낸다. 이것은 유출되는 물질이 해역을 통과하는 시간의 평균이므로, 평균통과시간이라 한다. 정상일 경우에는 해역에 유입하는 물질이 여기에 체류하는 시간의 평균, 즉 평균체류시간 τ_r 과 같아진다.

$$\tau_r = \tau_i = Mo/G \quad (10)$$

Mo/G를 치환시간 또는 교환시간이라 부르는데, 이것은 만내의 총물질 Mo에 관한 교환시간 스케일이 아니고 실제로는 유입물질 G에 관한 교환 스케일이므로 주의하여야 한다.

내만의 용적을 V, 내만의 염분을 C_B, 만외의 염분을 C_o라 하면, 만내의 담수존재량 V_f는 다음과 같다.

$$V_f = V(C_o - C_B)/C_o \quad (11)$$

단위시간 당 R의 하천수가 공급된다면 유입하천수의 평균체류시간 또는 평균통과시간은 다음과 같다.

$$\tau_r = V_f/R \quad (12)$$

하천으로부터 단위시간에 유입하는 물질량을 q라 하면 만내의 물질의 총량 Mo는 다음과 같다.

$$Mo = q(V_f/R) = q\tau_r \quad (13)$$

여기에서는 물질의 연속유입을 생각했는데 순간유입의 경우에도 물질의 움직임은 같기 때문에 평균체류시간 τ_r 은 공통이다. 완전혼합의 경우에는 τ_r 과 τ_r 이 일치한다.

이상의 내용을 현실에 적용할 때에는 자료의 부족, 대표적 지표 C_o, C_B결정의 임의성이 남는다. 복잡한 교환현상을 하나의 Parameter로 표현하는데는 무리가 따르기 마련이므로 이 한계를 알고 그 범위에서 이용하는 것이 필요하다.

소내만에서의 해수교환율의 제안

Parker(1972)의 교환율에 의하면

$$\gamma_p = \frac{q_s}{Q_F} = \frac{(C_F - C_E)}{(C_o - C_E)} \quad \text{가 된다.}$$

여기서, C_o는 만외수의 농도, C_E는 썰물 때의 평균농도, C_F는 밀물 때의 평균농도이다. 그리고 C_F, C_E는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_F = \int_0^{T_f} \int_A Cu \, dAdt / \int_0^{T_f} \int_A u \, dAdt \quad (14)$$

$$C_E = \int_0^{T_e} \int_A Cu \, dAdt / \int_0^{T_e} \int_A u \, dAdt \quad (15)$$

여기서, T_f, T_e는 각각 밀물과 썰물의 지속시간이고, C와 u는 관측점의 염분과 유속, A는 만구 단면적을 나타낸다.

C_F, C_E를 구하기 위해서는 단면전체에 걸쳐 적어도 1조석주기 동안 유속과 염분의 연속관측이 필요하다. 그러나 소내만에서는 만구의 폭이 좁고 선박의 출입이 빈번하여 만구에서의 유속과 염분의 연속측정이 사실상 불가능하다.

그래서 저조시에서 다음 저조시까지 1조석주기만에 만내 염분량의 변동과 만외 유입수의 염분과의 관계를 이용하여 해수교환율을 계산하였다. 본 연구에서 제안한 해수교환율을 모식적으로 생각해보면 (Fig.2)와 같다.

처음 저조시의 만내평균염분과 만외수의 체적을 각각 C₁, V₁이라 한다(a). 그 후 시간이 경과하면서 밀물에 의해 만외수가 유입하여 고조시에는 평균염분 C_o를 가진 만외수가 만내에 들어왔다(b)가 썰물을 따라 만외로 유출되고 다음 저조시에는 어

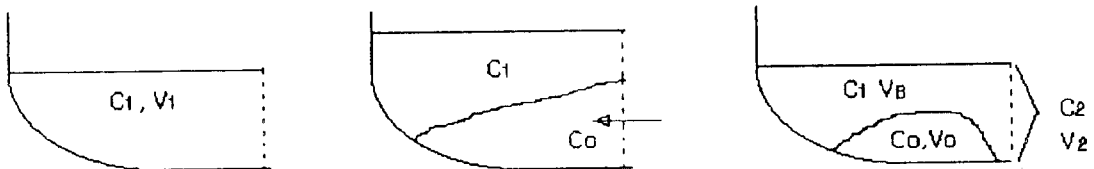


Fig.2 Schematic view of water exchange process

면적 V_0 를 가진 만외수가 만내에 머무르게 된다. 그리고 이때 만내수와 만외수가 혼합되어 만내 평균염분과 만내수의 체적이 각각 C_2 와 V_2 가 되는 것으로 한다(c). 이상을 간단한 수식으로 나타내면 다음과 같다.

여기서, 하천수의 유량은 만내수에 비해 월등히 작아 무시할 수 있다면

$$C_1 V_B + C_0 V_0 = C_2 V_2 \quad (16)$$

$$V_B + V_0 = V_2 \quad (17)$$

(17)식을 이용하여 (16)식에서 V_B 를 소거하면

$$\begin{aligned} C_1(V_2 - V_0) + C_0 V_0 &= C_2 V_2 \\ V_0(C_0 - C_1) &= V_2(C_2 - C_1) \\ \gamma &= \frac{V_0}{V_2} = \frac{(C_2 - C_1)}{(C_0 - C_1)} \end{aligned} \quad (18)$$

위의 식에서 C_1 , C_2 , C_0 , 를 관측에 의해 구하면, 만외수의 만내전체용적에 대한 해수교환율($\gamma = V_0/V_2$)을 계산할 수 있다.

여기서, C_n 은 다음과 같이 구하였다.

$$C_n = \frac{\int_{T_i-1}^{T_i+1} \int_S Ch \, dS \, dt}{\int_{T_i-1}^{T_i+1} \int_S h \, dS \, dt} \quad (C_n = 1, 2) \quad (19)$$

여기서, T_i 은 저조시이고, C 와 h 는 관측점의 염분과 수심이다. 그리고, S 는 만내 표면적이다.

저조 전후 1시간, 도합 2시간 동안 만내의 평균염

분을 측정하여 만전체의 평균염분을 산출하였다.

그리고, 만외수의 염분은 일정하지않고 시간과 장소에 따라 달라져 어느 값을 만외수의 대표치로 하느냐는 해수교환율의 산정에 대단히 중요하고 논란의 대상이 되어온 문제이다. 본 연구에서는 만구에서 유입하는 만외수의 평균염분을 그 값으로 하였다. 만외에는 여러 다른 성분 곧 다른 염분을 갖는 해수가 분포하지만 해수교환율의 산정에서 중요한 부분은 결국 밀물 때에 만구를 통하여 만내로 들어오는 해수이다. 밀물 때에 동호만의 만구에서의 염분과 수온의 연직구조는 Fig. 3과 같다.

동호만의 만구에서 성층구조를 이루어 만내수와 만외수의 구분이 명확하다. 저층의 염분을 평균하여 만외수의 평균치로 하여 이 문제를 해결하였다. 그리고, 앞에서 언급한 바와 같이 기존의 교환율은 밀물 때의 유입량 중에서 교환된 해수량 ($\gamma = q_{EX}/Q_F$) 또는 처음으로 만내에 들어오는 외양수의 양 ($\gamma_P = q_S/Q_F$)이 차지하는 비율을 교환율로 산정하였다. 그러나 이러한 비율은 조랑(Tidal Prism)에 대한 비율이고 만전체에 대한 비율은 아니다. 조랑은 지역마다 틀리고 같은 지역도 월령에 따라 변하므로 기존의 교환율로는 그 만전체의 해수가 교환되는 데 얼마의 시간이 걸리는 지는 알 수 없었다. 예를 들면 어떤 두개의 만의 교환율이 10%라 할 때 이 수치만 가지고는 이 두개의 만

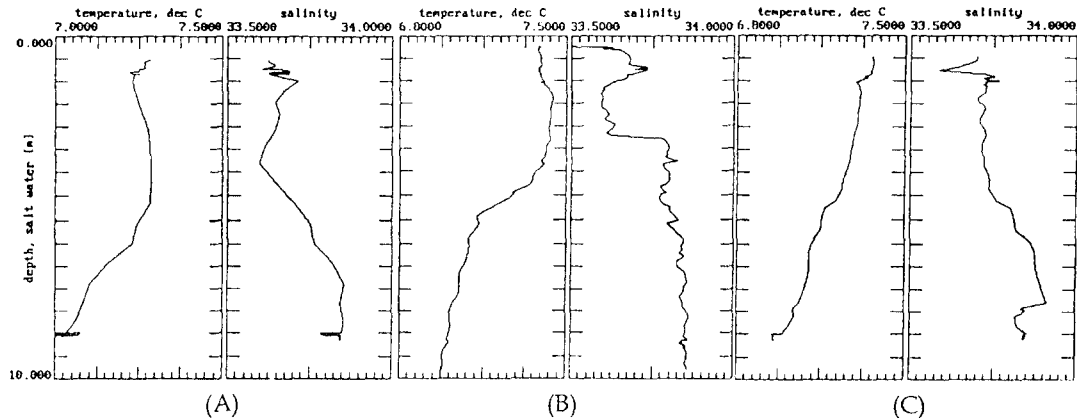


Fig. 3. Vertical distribution of water temperature and Salinity at the bay mouth during observation. (A) Flood Tide (B) High Water (C) Ebb Tide

의 교환의 정도가 같다고 말할 수 없다. 이 수치는 조랑에 대한 비율이기 때문에 조랑과 만의 용적이 틀리는 두개만의 교환율은 틀릴 수밖에 없을 것이며 조랑은 크고 만의 용적은 작은 쪽이 같은 교환율이라도 교환의 정도는 커질 것이다. 본 연구에서 제안한 교환율($\gamma = V_1/V_2$)은 전체 만내용적 중에서 밀물 때에 만내로 들어온 만외수의 비율이어서 기존의 조랑에 대한 교환율과는 다르다. 이 경우에 전체만의 평균염분을 구하는 어려운 점이 있으나 동호만과 같은 소내만에서는 단시간내에 전체만의 염분의 연직분포의 측정이 가능하였다.

동호만의 해수교환율

동호만은 충무항의 동편에 위치한 어항으로서, 만내면적이 232,200m²이며 1988년에 축조 완공하였다. 매립 후 각종 거주시설이 들어서면서 오폐수로 인한 해수오염이 문제가 되고 있으며 일부에서는 방파제가 잘못되어 만내외의 해수교환이 원활하지 못하다는 주장이 제기되어왔다. 동호만의 관측위치도는 Fig.4와 같다.

97년 2~4월에 Fig.4의 관측지점에서 CTD(SEA BIRD, SBE 19)를 이용하여 수심별 염분, 수

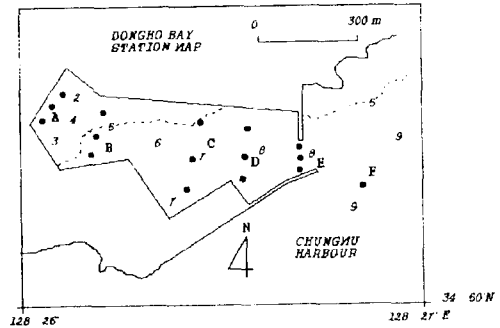


Fig. 4. Observation stations in Dongho Bay

온, DO 등을 측정하였다. 만내의 조시별 종단면 염분분포는 Fig. 5와 같다.

각 조시별 연직평균염분과 그 값으로 구한 교환율은 Table 1과 같다.

Table 1. Exchange ratio in Dongho Bay

	C1(%)	C2(%)	Co(%)	$\gamma(\%)$
Feb.4	33.7320	33.7550	33.8200	20.5
Apr.8	33.9091	33.9268	33.9835	23.8

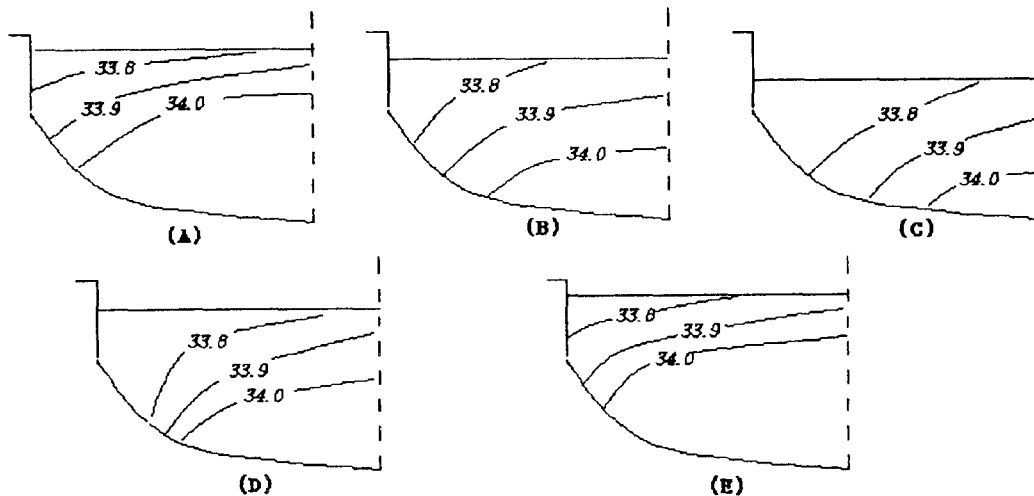


Fig. 5. Cross sections of Salinity during on tidal cycle. A) High water B) Ebb tide C) Low water D) Flood tide E) Next High tide

Table 2. Fresh water residence time in Dongho Bay

Date		Co(%)	C _B (%)	V(m ³)	V _F (m ³)	R(m ³ /day)	rr*(day)
Feb.4	1st	33.8200	33.7320	1,555,740	4048.0	1,680	2.41
	2nd	33.8200	33.7550	1,462,860	2811.5		1.67
Apr.8	1st	33.9835	33.9091	2,043,360	4473.5		2.66
	2nd	33.9835	33.9268	2,066,580	3448.0		2.05
Average							2.20

그리고, 식(11), (12)를 이용하여 담수의 체류시간을 계산하고 교환율과 비교하였다. 계산의 결과는 Table 2와 같다.

산정된 담수체류시간의 평균은 2.2일로 이를 조석주기로 환산하면 4.25주기에 해당된다. 이 값은 반일주조의 주기를 12시간 25분으로 환산하면 조석 1주기당 23.5%의 교환율이 되며, Table 1의 수치와 유사한 결과를 나타내었다.

요약 및 결론

해수교환의 문제는 수괴의 형성, 생물을 포함한 물질순환, 해양오염 등에 있어 대단히 중요하다. 본 연구에서는 해수교환의 기존연구를 검토하고 만전체의 연직평균염분을 이용한 해수교환율의 산정방법을 제시하였다. 기존의 교환율에서는 만구단면에서의 밀물과 썰물의 평균염분 C_E, C_F가 필요하고 C_E, C_F를 구하기 위해서는 단면전체에 걸쳐 적어도 1조석주기 동안 유속과 염분의 연속 관측이 필요하다. 그러나 동호만과 같은 소내만에서는 선박의 출입이 빈번하고 만구의 폭이 좁아 만구에서의 유속과 염분의 연속측정이 사실상 불가능하다. 그래서 만구에서의 평균염분을 사용하지 않고 각조시별 만내평균염분을 이용하여 해수교환율을 산정하였다. 여기에서 제시된 해수교환율은 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{V_o}{V_2} = \frac{(C_2 - C_1)}{(C_o - C_1)} \quad (18)$$

위의 식에서 V₂는 다음 저조시의 만내용적, V_o는 밀물시에 유입되었다가 다음 저조시에 만내에 머무르는 만외수의 용적이다. C₁은 임의의 저조시

의 만내평균염분, C₂는 다음 저조시의 만내평균염분이고 C_o는 유입만외수의 평균염분이다.

만외수의 평균염분 C_o는 만구에서 유입하는 만외수의 평균염분을 취하여 C_o의 임의성을 보완하였다.

1997년 2월 4일과 4월 8일에 해양관측을 실시하여 제안한 공식에 적용한 결과 각각 26.1%와 23.8%의 교환율이 산정되었다.

그리고 담수의 체류시간을 구하여 교환율과 비교하였다. 식(11), (12)을 이용하여 만내 담수존재량을 산정하고 만내의 하구유입량으로 평균체류시간을 계산한 결과 산정된 평균담수체류시간은 2.2일로 이를 조석주기로 환산하면 4.25주기가 되며 조석 1주기당 23.5%의 교환율에 해당하여 공식에 의한 수치와 유사한 결과를 나타내었다.

참고문헌

1. Awaji(1980) : Tidal exchange through a Strait, J. of Physical Oceanographics, 10, 1499 - 1508.
2. Hogo B. Fischer(1979) : Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic press, 264 - 266.
3. Imasato, N., T. Awaji (1980) : Tidal exchange through Naruto, Akasi and Kitan Straits, J. Oceanogr. Soc. Japan, 36, 151 - 162.
4. Imasato, N. (1983) : A Numerical Experiment on Water and salt exchange through the Akasi and Naruto Straits, J. Phys. Oceanogr., 13.
5. Imasato(1994) : Three-dimensional Numerical Experiments on Tidal exchange through a Narrow Strait in a Homogeneous and a Stratified Sea, 日本海洋學會誌, 50, 119 - 139.
6. Mazda(1984) : Water exchange and Material exchange through a Strait due to Tidal Flow, 日

- 本海洋學會誌, 40, 19 - 28.
7. Parker, D.S., D.P. Norris and A.W. Nelson (1972) : Tidal exchange at Golden Gate. Proc. of ASCE, 98, SA 2.
 8. Takeoka, H. (1984) : Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea, Continental Shelf Research, 3(3), 311 - 326.
 9. Takeoka, H. (1986) : The frequency response of the Seto Inland Sea to several time-varying inputs, Continental Shelf Research, 6(5), 627 - 638.
 10. 今里哲久・談路敏之(1982) : 明石・鳴門海峽を 通しての海水交換の數値實驗, 沿岸 海洋研究 ノート, 20(1), 19 - 32.
 11. 柏井 誠(1984) : 海水交換概念 と 海水交換率, 日本海洋學會誌, 40, 135 - 147.
 12. 西條八束(1984) : 内灣の環境科學, 培風館, 149-155.
 13. 武岡英隆(1984) : 沿岸海域 の 海水交換, 沿岸海洋研究 ノート, 20(2), 169 - 182.
 14. 武岡英隆(1987) : 海水交換 の 調査法と問題點, 沿岸海洋研究 ノート, 24(2), 145-155.
 15. 宇野木早苗(1980) : 海水交換とその素科程について, 沿岸海洋研究 ノート, 17(2), 89 - 98.
 16. 宇野木早苗(1993) : 沿岸海洋物理學, 東海大學出版會, 537 - 541.
 17. 김중화, 장선덕(1985) : 거제만의 해수교환, 한국수산학회지, 18(2), 101 - 108.
 18. 남기수(1982) : 마산만의 담수교체시간, 해양연구소보, 4, 1 - 10.
 19. 이병걸, 조규대, 김동진(1991) : 수영만에 유입된 담수의 체류시간과 그 계절적 변동특성, 어업기술 27(3), 170 - 177.