

灣口를 통한 海水流出入과 灣內水塊의 海水交換性

金 鍾 華

釜山水產大學校

(1990년 11월 20일 접수)

Cross-Sectional Velocity Variability and Tidal Exchange in a Bay

Jong-Hwa KIM

National Fisheries University of Pusan

(Received November 20, 1990)

Chinhae Bay, included small ports, is the region which the red tide phenomenon is occurred frequently in summer season. Field sampling of 4 cross-sections in the bay resulted in detailed informations on cross-sectional velocity distributions, salt concentrations and discharge during one consecutive tidal cycle in summer season, 1983.

High velocity cores reoccur two times a semi-diurnal tidal cycle at the same cross-sectional location, lower layer, in Kadok Channel during the spring tide.

The tidal exchange ratio was estimated by Eulerian method. The range of exchange ratios in central Kadok Channel are 9.3-17% at the spring tide and 16.9-21.8% at the neap tide. On the other hand, its range in Masan bay-mouth is 8.7% at the spring tide and 2.0% neap tide, respectively.

緒 論

沿岸海域은 생물생산의 활동과 육상으로부터 유입되는 영양물질의 공급등 인간생활과 밀접한 곳이다. 이곳의 水塊특성 즉, 유황유속과 염분농도, 오염물질의 유출입 거동의 파악은 매우 중요한 것이다.

특히, 灣口를 통한 해수유출입과 영양물질의 유입과의 균형이 깨질 경우, 연안해역은 자정능력을 상실할 것이며, 부영양화로 인해 적조현상등, 생물의 생산활동을 저해하게 될 것이다.

해수가 정제하기 쉽다는 것은 대상해역과 외부해역간의 해수의 유출입이 적어서 해수의 교환이 약하게 됨을 의미한다. 그래서 생물생산, 환경문제 또는 灣內水의 水塊형성과 관련해서 일본에서는 많은 연구가 진행되어 왔다¹⁻⁵⁾. 다만 문제가 되는 것은 관측의 곤란성과 조건의 다양성 때문에, 그 해명은 그다지 충

분치 못하다.

본 연구에서는 적조발생이 빈번한 진해만과 그 內灣을 대상으로 하여, 특히 夏季의 교환성을 파악하기 위해, 灣口를 통한 해수유출입구조와 수괴의 거동을 정량적으로 분석하고, 이를 근거하여 해수교환의 세기를 추정하며, 또 하구역 분류 model에 적용시켜 교환의 기구를 규명코져 하였다.

資料 및 方法

1. 海洋觀測

灣口단면의 관측은 1983년 7-10월까지 5회에 걸쳐 진해만의 각 조사점(A, B, C, D 단면)에서 측류와 수온, 염분 관측을 실시 하였으며, 外海水의 농도를 구하기 위하여 가덕도 남단과 거제도 동부에 위치

한 3점에서 上, 中, 下의 염분농도를 측정하였다 (Fig. 1).

灣의 종단면 관측은 마산항 안쪽에서부터 가덕水道까지의 16점을 택하여 수온, 염분의 연속측정을 행하였다 (Fig. 1).

2. 断面通過流量

반 조석주기동안에 만구단면의 통과유량 Q는

$$Q = \int_0^{T/2} Q_i dt \quad (1)$$

단, $Q_i = B\{0.174(q_{0.07} + q_{0.93}) + 0.326(q_{0.33} + q_{0.67})\}$ 이다.

B: 만구의 폭, q_i : 연속평균수평유속 x 수심 i: 만구폭과 관측점과의 거리비이다⁶⁾.

3. 海水交換率의 推定

Parker et al (1972)는 交換率의 측정단면에서, 유출시와 유입시의 유량 및 염분농도를 구하여 교환율

추정하였다. 이 방법은 유출시에 灣外로 나간 水塊가, 다음의 유입시에 외해수와 어느정도 교환해서 灣內로 되돌아 오는가를 구한 것으로서, 식(2)에 의해 구하였다.

$$r_0 = \frac{\bar{C}_F - \bar{C}_E}{C_0 - \bar{C}_E} \quad (2)$$

여기서, r_0 : 해수교환율, \bar{C}_F : 유입수괴의 평균농도, \bar{C}_E : 유출수괴의 평균농도, C_0 : 외해수의 농도를 나타낸다⁷⁾.

4. 成層循環係數

Hansen & Rattray (1966)에 의하면, 성층계수 δ 는

$$\delta = (\bar{S}_B - \bar{S}_S) / \bar{S} \quad (3)$$

단, \bar{S}_S : 만구단면에서 표층의 평균 염분농도, \bar{S}_B : 저층염분의 평균, \bar{S} : 연속단면 전층의 염분을 평균한 염분농도이다.

순환계수 C는,

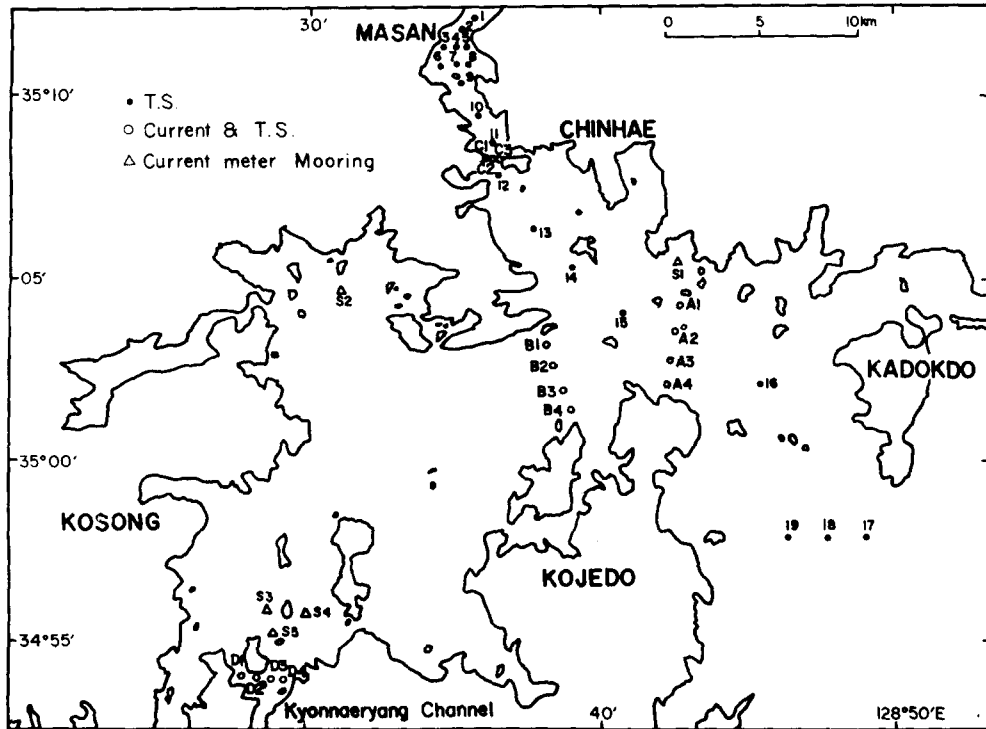


Fig.1. Sampling stations in Chinhae Bay.

$$C = \bar{U}_s / \bar{U} \quad (4)$$

여기서, \bar{U}_s : 연직단면에서 표층의 평균유속, \bar{U} : 연직단면의 평균유속이다. 식(4)는 담수의 흐름과 담수가 유입되어 연행가입 혹은 渦動 확산에 의해서 혼합된 물의 흐름과의 비를 나타낸다.

結果 및 考察

1. 灣口斷面의 흐름構造

大潮期の 1조석주기동안 가덕수도단면의 測流자료에서 얻은 시간별 等流速曲線圖는 Fig. 2와 같다.

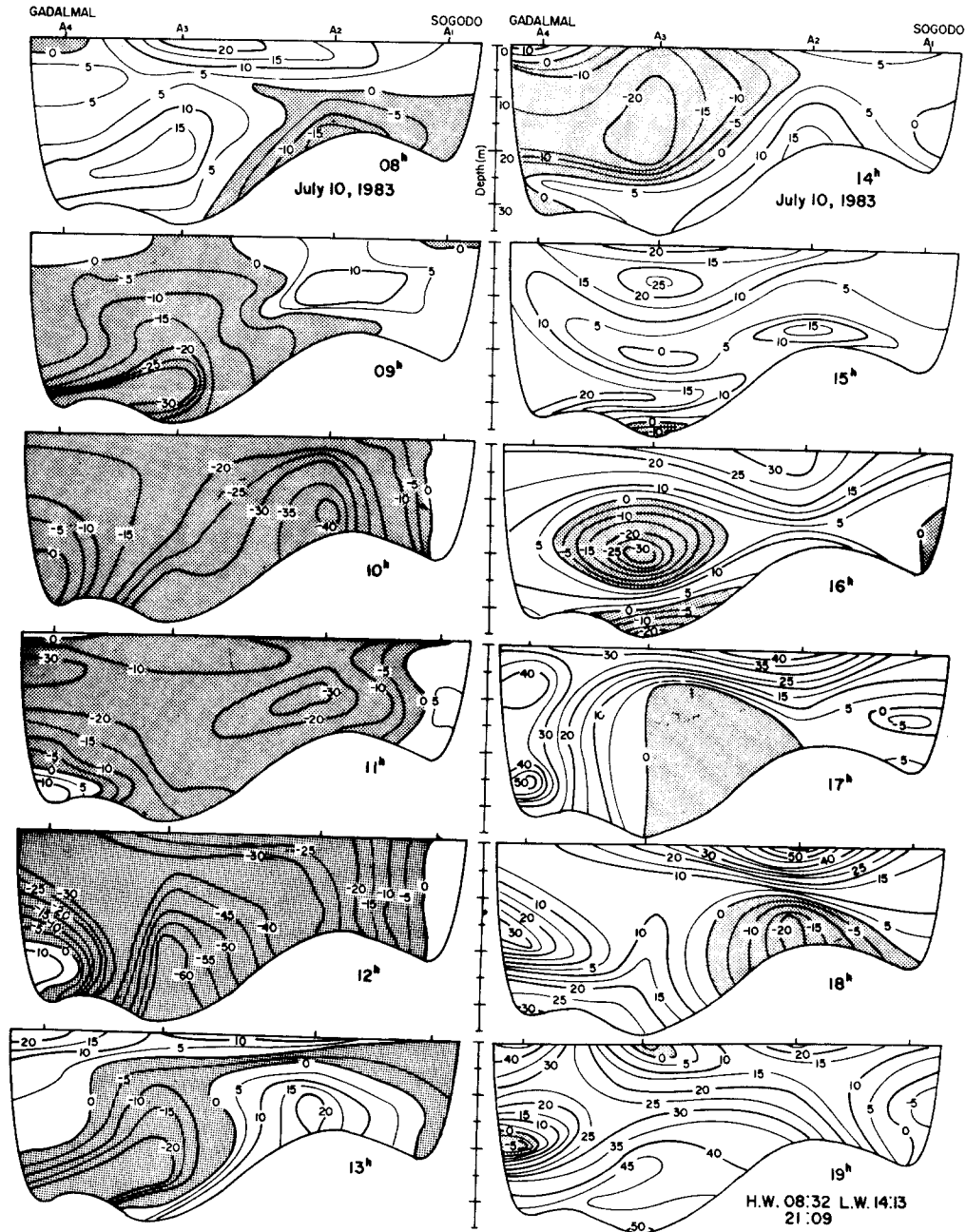


Fig. 2. Isopleths of flow velocity in Kadok Channel of July 10, 1983. Shaded part denotes outward flow. High water was at 08:32 and 21:09 hours while low water at 14:13 hours.

여기서 유·출입의 특성을 보면, 첫째, 썰물과 밀물의 轉流는 高潮 또는 底潮전에 水道북부(St. A2)의 하층에서 먼저 시작되고, 차츰 단면남부(St. A3)가 轉流되어 水道단면전체로 퍼진다. 썰물때의 流軸은, 초기에 단면북부에서 단면남부로 이동하였다가, 盛期에 다시 북쪽으로 이동하고, 轉流되기전에 다시 남쪽으로 이동함으로써 반 조석주기에 대략 두차례의 진동을 하였다. 또 流軸은 대체로 하층에 존재하는 경향이 있다. 밀물盛期에는 流軸이 단면의 남부와 북부에 양분되어 존재하며, 북부에는 상층에 존재하지만 남부에는 상층과 하층 또는 중층과 저층에 존재하여 복잡한 양상을 띠고 있다.

둘째, 썰물때는 水道단면전체가 東流를 보이고, 양 단면 가장자리에 미세한 反流가 존재할 따름이다. 반면에, 밀물때는 西流가 주류를 이루지만, 층에 따라 만외로 유출하는 反流가 水道단면 곳곳에 존재하여 복잡한 유동구조를 보인다.

2. 海水流出入量

각 단면에서 연속測流한 유속자료로 부터 산출한 진해만의 두 단면통과 유량을 보면, 반 조석주기동안 대조기의 漲潮流量은 가덕水道가 $471 \times 10^6 m^3$ (86%), 견내량水道 $74 \times 10^6 m^3$ (14%)이다. 落潮流量은 가덕水道가 $507 \times 10^6 m^3$ (90%), 견내량수도 $53 \times 10^6 m^3$ (10%)로 추정되어, 진해만의 해수교류는 가덕수도가 전체 교류량의 86~90%, 견내량수도가 10~14%이다. 소조기의 漲潮流量은 가덕수도가 $79 \times 10^6 m^3$ (61%), 견내량수도 $51 \times 10^6 m^3$ (39%)이다. 落潮流量은 가덕수도가 $164 \times 10^6 m^3$ (80%), 견내량수도 $41 \times 10^6 m^3$ (20%)로서, 소조기의 전체교류량에 대하여 가덕수도가 61~80%, 견내량수도 20~39%이다. 따라서 가덕수도를 통한 해수유출입량이 진해만의 해수교류·교환을 지배한다.

가덕수도단면의 유량을 계산방법에 따라 비교해 보기로 한다. 森北(1966)에 의한 방법은 水道단면의 관측점에서 얻은 단면직각평균유속과 수심 및 灣口幅에 의하여 순간유량을 계산하는 방법이다(식1). 또, 等流速曲線에 의한 방법은 每時間別 측정자료로부터 얻은 단면직각방향의 등유속곡선의 면적에 유속을 곱하여 유량을 계산하는 방법이다. 유량 Q는

$$Q = \int_0^{T/2} \sum_{i=1}^n a_i V_i dt \quad (5)$$

단, a : 단구단면의 등유속구간면적, V : 단면직각 방향의 유속, T : 조석주기이다. 이들 두가지 방법에 의해 계산한 반조석주기동안의 가덕수도단면의 유량은 Table 1과 같다. 이 결과 등유속곡선에 의한 유량은 森北(1966)에 의한 유량보다 적게 나타났다(0.6배). 森北(1966)에 의한 유량계산에는 단면직각 평균유속을 구할때, 水面下 0.2h층에서 최대유속이 존재한다고 가정하여 계산한 점과, 수위변동이 고려되지 않은데 따른 誤差등이 생길수 있다.

Table 1. Comparison of tidal transport calculation data through the Kadok channel at spring tide

Tide	Tidal transport (m^3)		B/A
	Morikeda method (A)	Isopleth method (B)	
Flood flow	471×10^6	291.5×10^6	0.6
Ebb flow	507×10^6	292×10^6	0.6

즉, 流軸의 이동에서 본 바와 같이, 최대유속은 썰물때는 대체로 중층이하에서 존재하나, 밀물때는 水道단면북부에서 상층에 일시 존재하고, 남부에서는 상·하층에 불규칙하게 존재한다. 그러므로, 유량계산시 최대유속 0.2h와 평균유속 0.6h는 조류가 우세한 연안해협이나 內灣에서는 오차가 큼으로 실측을 통해 확인할 필요가 있다. 등유속곡선도에 의한 유량은 수위변동에 따른 오차와 면적의 계산 및 대표유속값의 선정에 오차가 다소 있을 수 있다. 그러나, 이 오차는 가덕水道의 경우 森北(1966)에 비해 비교적 적을 것으로 생각된다. 따라서, 내만이나 수도 단면의 통과유량계산시에는 해저지형, 단면의 형태, 해안선의 윤곽, 만구의 변화와 수심변화 등을 고려할 필요가 있다.

3. 海水交換率의 定量的 分析

Table 2는 식(2)에 의한 해수교환을 표시하였다. 大潮期의 경우, 가덕水道(A단면)와 견내량水道(D단면)의 교환율은 각각 두정점을 평균한 값이 11.8~13.2%범위이고, 마산만 입구(C단면)은 8.7%로서 다소 낮은 交換率을 나타냈다. 소조기의 경우, 가덕수도와 견내량수도의 정점을 평균한 값이 19.4~34.0%범위이나, 馬山灣입구는 2.0%로서 10배 이상의 현저한 차를 나타냈다.

이것은 대조기보다 소조기의 경우가 外海水의 유입

Table 2. Tidal exchange at each section by Parker's method

Cross-section	St.	\overline{C}_F (%)		\overline{C}_E (%)		r_o (%)	
		Spring	Neap	Spring	Neap	Spring	Neap
A	A2	32,446	29,269	32,393	29,085	9,3	21,8
	A3	32,509	29,349	32,401	29,231	17,0	16,9
C	C2	30,36	31,88	30,28	31,44	8,7	2,0
D	D2	30,817	29,861	30,739	29,824	10,8	5,0
	D3	30,809	30,424	30,717	30,171	12,7	62,9

이 적으므로 인해, 해수의 교환이 거의 멈추고 있음을 의미한다. 이런 시기는 유속이 아주 작고 수온의 연직변화도 심하여, 적조현상이 일어나기 쉬운 환경으로 변하게 될 것이다.

4. 海水交換機構

여름철 鎭海灣의 해수교환기구를 파악하기 위하여 성층·순환계수를 구하여 나타낸 것이 Fig. 3이다.

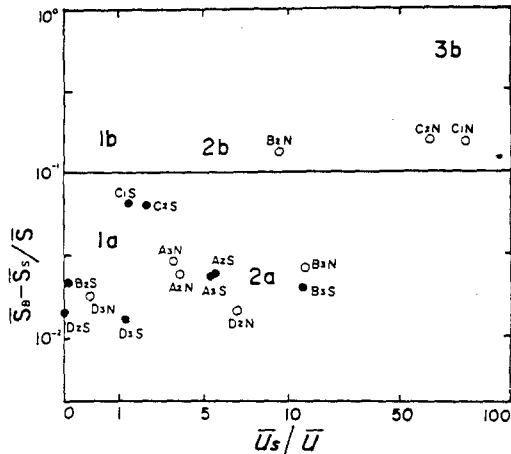


Fig. 3. Stratification - circulation diagram in Chinhae Bay. Solid circles denote data at spring tide and open circles those at neap tide.

Hansen & Rattray (1966)의 분류에 의하면, 4개 단면 A, B, C, D의 중앙점 8개소에 대한 成層係數의 범위는 0.012~0.174로서, 이 값은 부분적 성층상태에 해당한다. 순환계수는 0.006~81.7의 범위로서, 이것은 유속이 깊이에 대하여 균일한 흐름으로부터 깊이 방향의 유속경도가 큰 유동구조를 포함하고 있다. 특히, 가덕水道는 대체로 2a에 속하여, 흐름은 깊이에 따라 방향이 변하고 약간 성층되었으나 잘 혼

합된 염분분포를 나타내고, salt flux는 주로 移流에 의하지만 부분적 확산이 따른다.

馬山灣 입구의 C 단면은 소조기에 3b에 속하여, 고도로 성층된 상태이나 대조기에는 1a와 1b의 중간으로 복잡한 구조를 하고 있다.

Fig. 4는 鎭海灣中 馬山灣 입구의 C₂점과 가덕수도 A₂점에서의 밀도의 시간변화를 圖示한 것이다.

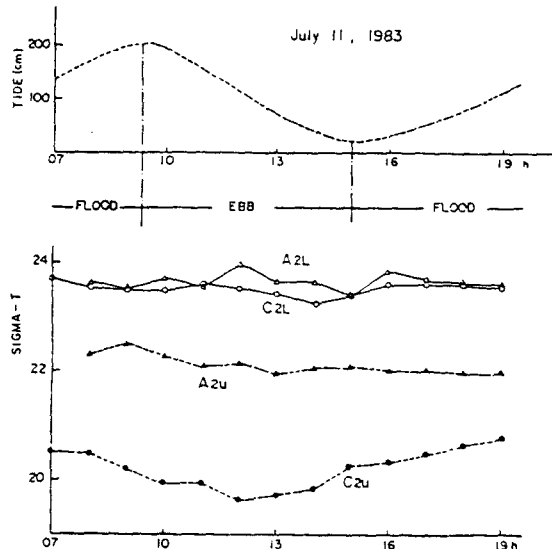


Fig. 4. Changes of sigma-t at Kadok Channel (A₂) and at the inlet of Masan Bay (C₂).

여기서, 첨자 U는 상층(5m), 첨자 L은 하층(A 단면: 30m, C 단면: 20m)을 뜻한다. 上層密度의 경우, 가덕수도(A_{2u})는 진해만의 조석에 관계없이 거의 일정하나 마산만입구(C_{2u})는 조석변화에 따라 변한다. 그러나, 兩水道底層의 밀도곡선은 조석의 영향을 거의 받지 않고 단주기파형을 그린다.

따라서 가덕수도 A 단면과 마산만 입구의 C 단면의 사이에 sill과 비슷한 해저지형을 형성하고, 가덕수도

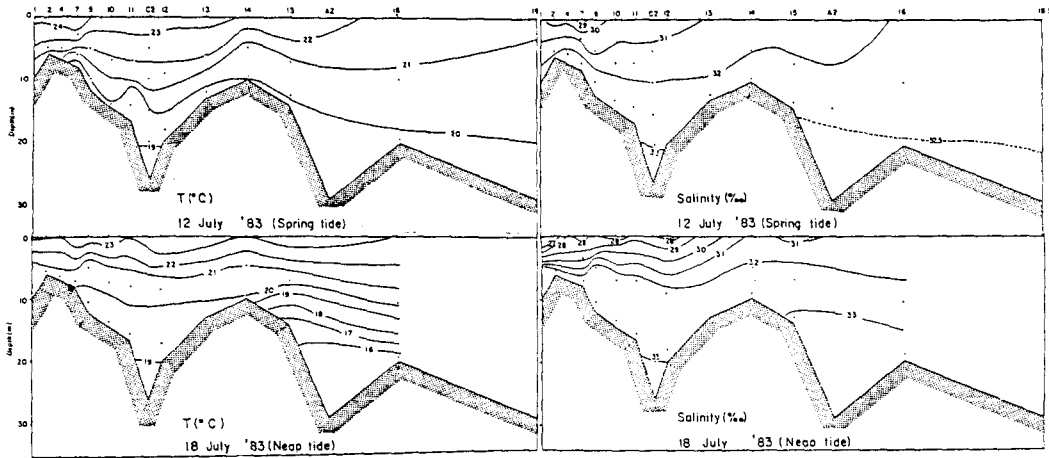


Fig.5. Longitudinal-sections of temperature(left) and salinity(right) from Masan Bay to Kadok Channel.

A₃점의 상층의 tidal excursion은 반조석주기동안 최대유속 75cm/sec일때 약 16km이므로, 잠도와 부도 부근의 얇은 언덕을 통과해서 마산만 입구 C₂점까지는 충분히 도달한다.

또, 外灣水の 밀도가 內灣水보다 크면, 밀물때 상대적으로 높은 고밀도가 tidal excursion으로 인하여釜島水道의 언덕을 따라 밀도가 낮은 내만으로 유입된다. 썰물때는 밀도가 낮은 표층수는 외만으로 흘러나가고, 밀물때 들어왔던 고밀도·고염분수는 馬山灣 입구의 저층에 가라앉고 일부는 혼합되어 외만으로 유출될 것이다. 그 결과, 밀물때 들어온 외해수는 1조석주기후에 마산만 입구의 저층에 어느정도 갇히게 될 것이다. 즉, 두 水塊의 밀도차가 크면 클수록 이러한 "tidal trapping" 활동은 활발할 것이다.

이런 현상은 마산만 奥部에서 가덕도 남단까지의 流軸을 따른 종단면도 (Fig. 5)에 나타난 염분 및 수온분포로부터 이런 과정이 일어남을 추측할 수 있다.

따라서, 조차, 해저지형 및 吹送流등으로 해수의 혼합, 연행가입 또는 渦動擴散등에 영향을 끼치므로, 해수교환의 세기는 이들에 의해 크게 나타날 수 있음을 알 수 있다.

또, 담수유입이 많은 경우에는 상·하층의 염분과 밀도분포가 크게 달라서 해수유출입구조가 복잡한 河口域現象을 볼 수 있고, 해수교환은 주로 移流이나 부분적 擴散이 일어남을 알 수 있다.

要 約

물리적, 지형적 특성으로 구성되고 있는 灣內水塊의 유출입 구조와 해수의 교환능력을 정량적으로 구하기 위해, 진해만과 그 부속 內灣을 대상으로 하여 현지관측에 근거해서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 가덕수도 단면의 유출입 특성은 유출水塊의 流軸은 1조석주기동안 남북으로 2회 왕복운동을 진행하며, 대체로 하층에 존재한다. 유입수괴의 流軸은 남부와 북부에 양분되어 존재하는 경향이다. 전 시간에 걸쳐 反流현상으로 보이는 유출입 수괴가 동시에 존재한다.

2. 양 水道를 통한 해수유출입량의 비율은 가덕수도에서 대조기 약 86~90% 소조기 61~80% 유출입된다. 따라서, 가덕수도를 통한 수괴의 유출입이 灣의 해수교류·교환을 지배한다.

3. 夏季 만의 해수교환율은 양 수도에서 대조기 12~13%, 소조기 20% 이상이나, 마산만 입구에서는 대조기 9%, 소조기 2% 정도에 불과하다.

4. 하구역 특성으로 본 해수교환기구는, 가덕수도가 흐르는 깊이에 따라 방향이 변하고 약간 성층되나, 잘 혼합된 염분분포를 나타내어 salt flux는 주로 移流에 의존한다. 마산만은 sill의 해저지형과 만 입구에서 tidal trapping 현상으로, 고도의 성층된 상태를 보이고 있다.

参考文献

1. 宇野木早苗(1980) : 海水交換とその素過程について, 沿岸海洋研究ノート, 17(2), 89-98.
2. 掘江 等(1977) : 水理模型実験による海水交換率の算定, 第24回 海講論集, 491-495.
3. 中村 充・萩野静也(1979) : 密度成層流體中の海水交換機構に関する研究, 第26回 海講論集, 544-548.
4. 櫻井仁人(1983) : 鹿兒島灣口を通して海水流出入, 沿岸海洋研究ノート, 21(1), 45-52.
5. 上嶋英機 等(1986) : 灣内水塊の海水交換性, 第33回 海講論集, 571-575.
6. 森北常雄(1966) : 水工學便覽, 森北出版社, 東京.
7. Parker, D. S., D.P. Norris and A.W. Nelson(1972): Tidal exchange at Golden gate. Proc. of A.S.C.E., 98, SA2, 305-323.
8. Hansen, D. V. and M. Rattray(1966): New Dimensions in estuary classification. Limnol. Oceanogr., 11, 319-326.