

馬山灣의 海水交換率

金鍾華·張善德·金海龍

釜山水產大學

(1986년 7월 20일 수리)

Tidal Exchange Ratio in Masan Bay

Jong-Hwa KIM, Sun-duck CHANG, and Hae-Ryong KIM

National Fisheries University of Pusan

(Received July 20, 1986)

The characteristics of tidal exchange in Masan Bay were studied on the basis of salinity observations and current measurements in the summer of 1985. The exchange ratio of the sea water was calculated using three different formulas. The tidal exchange rate was estimated to be smaller than that of another bays in the southern coast of Korea. The tidal exchange ratios in Masan Bay at spring tide were deduced to be 2.4~11.7%, While those at neap tide were 2.0~9.1%.

Though tidal range of neap tide is smaller than that of spring tide, the tidal exchange ratio in the bay can be increased in case of highly stratified vertical structure.

緒 論

馬山灣은 鎮海灣의 北端에 위치한 內灣이며 平均水深 10 m, 남북의 길이 약 8.5 km 이고 평균해수용적이 $150 \times 10^6 m^3$ 인 小灣이다. 이 灣은 潮差가 비교적 작고 또 部分的 成層狀態의 河口域特性을 가지므로 海水순환이 활발하지 못한 편이다.

그러나, 인근 마산시와 창원시 및 창원공업기지 등으로 부터 都市下水量 약 $20 \times 10^4 m^3/day$, 産業廢水量 약 $5.4 \times 10^4 m^3/day$ 가 마산만으로 유입되고 있다(國立環境研究所, 1982). 이와같이 過多한 廢水 및 工業物質 등이 灣內에 유입됨으로써 어류 등 海洋生物의 서식을 부적합하게 만들고 있다. 뿐만 아니라 近해만까지 유입되어 빈번한 赤潮現象이 발생하고 많은 해양생물이 폐사하기도 한다 따라서, 灣內에 유입된 物質의 이동경로를 정확히 파악하기 위해서는 灣入口에서 일정한 시간간격을 가진 海洋要素의 연속관측이 필요하며, 이를 潮汐의 주기별로 분석하여 유입된 물질이 淸淨한 外海水와 어떻게 交換되며 또 어느정도 교환되고 있는가를 究明할 必要가 있다.

마산만의 海洋學의 연구로서는 金等(1976)의 環境學의 研究, 南(1982)의 淡水交潛時間 및 金等(1986)의 海水流動에 관한 보고가 있다. 그러나, 海水交換에 대해서는 駕莫灣(李等, 1982), 鎮海灣(金, 1984), 光陽灣(朴, 1984) 및 巨濟灣(金等, 1986)에 관한 보고가 있으나 馬山灣에 關係서는 찾아보기 힘든 실정이다.

본 연구에서는 赤潮現象이 빈번한 夏季를 택하여 마산 만구의 海水 및 鹽分收支를 기초로 하여, 海水交換의 程度와 그 메카니즘을 究明하여 馬山灣의 汚染對策 및 豫防의 그 기초자료를 마련하고자 한다.

海 洋 觀 測

大潮期인 1985年 6月 4~6日和 小潮期인 7月 12~14日에 馬山灣 入口의 횡단면에서 등간격의 5개 定點을 정하고, 表層으로부터 2m 간격으로 底層까지 流向流速, 鹽分, 水溫 및 水深을 每時間別로 連續測定하였다(Fig. 1).

측정기구는 rotor 형 유속계(TSV-2)와 digital 형

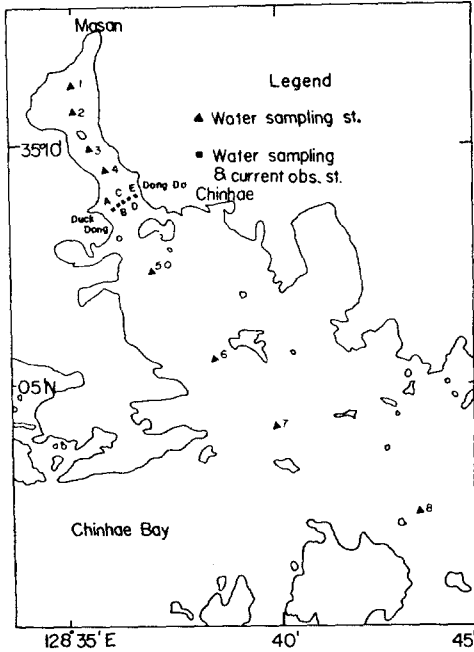


Fig. 1. Sampling stations in Masan Bay.

염분계(TDS-7)를 사용하였고, 사용선박은 부산수산대 실습선 부산 403號와 소형발동선 2척을 동원하였다. 또, 灣内外의 염분분포를 파악하기 위하여 灣内の 4개점과 灣外の 4개점을 택하여 表層, 中層 및 底層에서 鹽分을 측정하였다.

資料解釋

1. 海水收支(Water balance)

Fig. 2와 같이 灣口斷面에서 관측점을 중심으로 등간격의 小區間을 생각한다. 여기서, 횡단면 定點

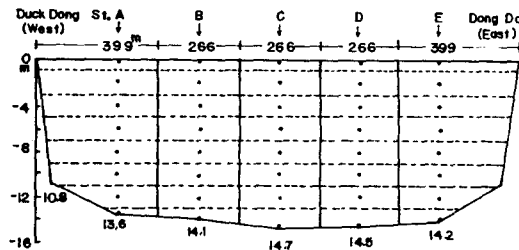


Fig. 2. Experimental cross-section at mean tide showing station notation, horizontal distance (m) of each section, time-averaged water depths(m) at each section, and schematic diagram of a subsection in Masan Inlet.

$i=1, 2, \dots, l$, 각 정점에 대한 水深 $j=0, 1, 2, \dots, m$, 觀測時間 $t=1, 2, \dots, n$, 임의시간의 소구간의 순간 斷面積 $a(i, j, t)$, 소구간의 流速을 $v(i, j, t)$ 라 하면, 임의시간 소구간의 平均 斷面積 \bar{a} 는

$$\bar{a}(i, j) = \sum_{t=1}^n a(i, j, t) / n \quad (1)$$

이다.

수심별 平均流速 v 는

$$v(i, j) = \sum_{t=1}^n v(i, j, t) / n \quad (2)$$

로 표현된다. 또, 식(1)과 식(2)로부터 平均단면의 순간 通過流量 Q 는

$$Q(i, j) = \sum_{t=1}^n \left[\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m a(i, j) \times v(i, j) \right] / n \quad (3)$$

로 계산하였다. 매 관측시간의 순간 통과유량을 1潮汐周期 동안에 만구단면을 통하여 유입된 量을 Q_F 유출된 量을 Q_E 라 하면 流出量에 대한 流入量의 比 α (water balance)는

$$\alpha = Q_F dt / Q_E dt \quad (4)$$

이다. 매 시간 鹽分 $S(i, j, t)$ 를 창조류시의 鹽分 S_F 와 낙조류시의 鹽分 S_E 로 하여, 낙조류시의 Salt flux에 대한 창조류시의 그것과의 比 β (mass balance)는

$$\beta = Q_F S_F dt / Q_E S_E dt \quad (5)$$

로 나타내었다.

2. 海水交換率의 算定

Parker *et al* (1972)은 창조류시에 灣内로 유입된 총해수량 Q_F 중에서 처음으로 灣内에 들어온 外海水量 Q_0 가 차지하는 比率을 海水交換率 r_0 로 정의하였다.

$$r_0 = Q_0 / Q_F \quad (6)$$

식(6)을 변형하여 염분치수로서 나타내면

$$r_0 = \frac{S_F - S_E}{S_0 - S_E} \quad (7)$$

이다. 여기서 S_0 는 관측기간중의 외만수의 平均농도이다.

$$\left. \begin{aligned} S_F &= \int_{\text{Flood}} Q_i S_i dt / \int_{\text{Flood}} Q_i dt \\ S_E &= \int_{\text{Ebb}} Q_i S_i dt / \int_{\text{Ebb}} Q_i dt \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

단, S_i 는 임의시간에 단면을 통과한 염분치를 의미한다.

이외는 달리 Kashiwai(1984)는 낙조류시에 灣外로 流出된 총해수량 Q_E 중에서 처음으로 灣外로 流出된 灣内水量 Q_B 가 차지하는 比率을 海水交換率 γ_E 는

結果 및 考察

$$\gamma_B = Q_B / Q_E \quad (9)$$

로 정의하고 식(9)를 Parker *et al.*(1972)의 방법과 같이 변형하면

$$\gamma_B = \frac{S_F - S_E}{S_F - S_B} \quad (10)$$

이다. 이때, S_B 는 관측기간중의 灣內 平均염분이 다.

한편 川村 등(1975)은 內灣이 潮汐에 의한 海水교환이 탁월한 경우에는 반조석주기동안 灣內 단면을 통과한 海水교류량 Q 중에서 실질적으로 교환하는 海水량 Q_{EX} 의 비율로서 海水교환율 γ_G 는

$$\gamma_G = Q_{EX} / Q \quad (11)$$

로 나타내었고 이를 단내와 만외의 염분으로서 표시하면

$$\gamma_G = \frac{S_F - S_E}{S_0 - S_B} \quad (12)$$

가 된다.

식(7), (10), (12)로부터

$$\frac{1}{\gamma_G} = \frac{1}{\gamma_0} + \frac{1}{\gamma_B} - 1 \quad (13)$$

이 成立되고, 교환율 γ_0 와 γ_B 를 알면 γ_G 를 구하는 것이 가능하다.

1. 海水收支

관측기간동안 灣內 단면의 water balance(α)를 식(4)에 의해 計算하여 Fig. 3에 나타내었다.

大潮期(a)는 수도서부인 A, B 정점에서 流入보다 流出이 우세하고 水道中央과 東部인 C, D, E 정점에서 流入이 우세하였다. 流出의 주된 經路는 西部의 B 정점을 中心으로 中·底層에 걸쳐있으며, 流入의 주된 經路는 東部の D, E의 2~6 m 층이다. 특히 E 정점의 2 m 층에서는 流入이 유출의 5배에 달한다. 小潮期는 대조기와는 반대로 水道中央과 동부인 C, D, E. 정점의 全 수심층에 걸쳐 流出된다. 主된 流出經路는 C, D 정점의 中層에 있으며, 流出단 계속된 곳이 2 m 층과 8 m 층에서 존재하였다. 流入의 主된 經路는 水道西部 A 정점의 하층에 있으며 流入에 가장 우세한 곳은 西部 A 정점의 12 m 층으로 유입의 6배에 달했다. 이들 water balance는 金 등(1986)이 유속을 주기적으로 나누어 도시한 net velocity의 分布와 잘 일치하고 있다. 식(5)를 이용하여 도시한 salt balance(B)를 Fig. 4에 나타내었다. 이들의 分布

St.A	B	C	D	E
1.061	0.965	1.341	1.975	1.914
0.928	0.455	0.084	1.995	5.106
0.241	0.318	1.487	2.309	2.863
0.197	0.450	2.370	3.262	2.069
0.260	0.647	1.600	1.417	1.601
0.789	0.623	1.579	0.665	1.105
0.752	0.387	0.556	0.588	0.574
1.371	0.495	0.068	1.087	1.448

(a)

1.360	1.430	4.067	3.228	0.720
0.142	-	-	0.015	0.151
2.458	0.658	0.040	0.102	0.163
0.440	0.160	0.057	0.078	0.018
1.486	1.225	0.067	0.162	-
1.354	0.317	0.375	0.317	0.091
6.354	0.874	0.730	0.643	0.223
1.607	0.615	0.860	2.208	0.097

(b)

Fig. 3. Distribution of water balance α at spring(a) and neap tide(b)

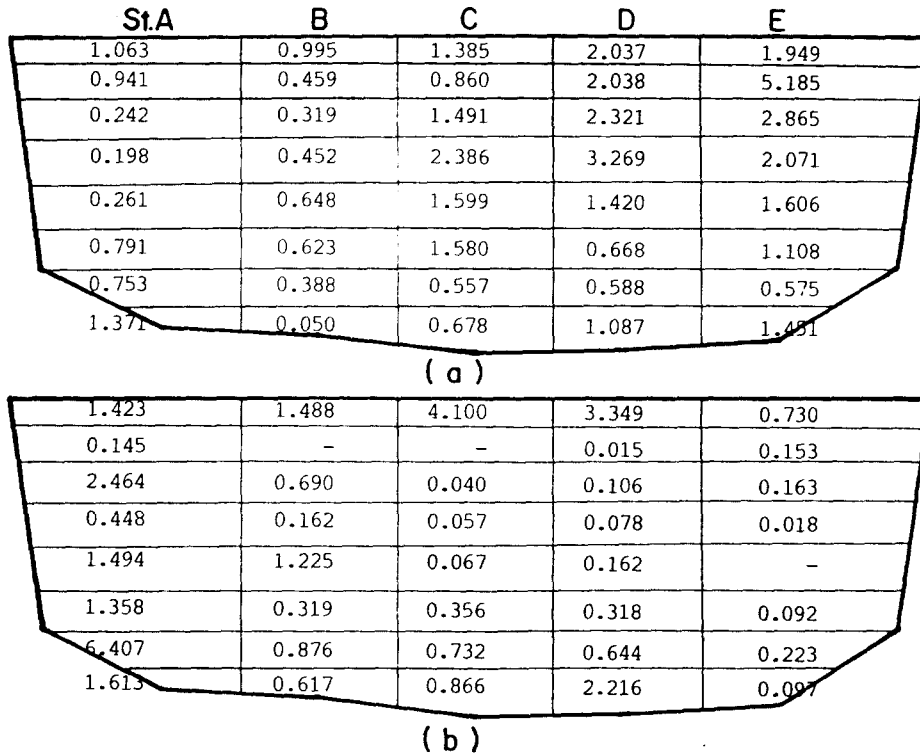


Fig. 4. Distribution of mass balance β at spring(a) and neap tide(b).

양상도 α 와 거의 일치하였다.

大·小潮期の各水深別 평균염분값을 창조류시의 염분값 S_F 로 나누어 Table 1~2에 나타내었다. 大潮期 Table 1의 낙·창조류시의 최대 鹽分差는 水道中央인 0 m 층에서 0.95%이고 염분차가 없는 곳은 D 정점의 12 m 층이다. 대체로 表層에서 底層으로 갈수록 염분값이 높아지나 C, D, E 정점의 2 m 층만이 0 m 층보다 약간 작은 값을 보였다. 小潮期 Table 2의 최대염분차는 2 m 층에서 1.30% 이고, 창조류시의 염분값이 낙조류시보다 적은 곳은 E 정점의 8 m 층이다.

小潮期는 강수량(관측기간 2일간 30.6 mm)으로 인하여 大潮期와는 달리 낙·창조류시의 염분차가 크고, 상하층의 염분차도 크게 다르다. 따라서 鹽分躍層도 뚜렷하여 2~4 m 층에 있음을 알 수 있다.

2. 海水交換 特性

식(10), 식(11) 및 식(13)을 이용하여 算出한 해수교환율은 Table 3과 Table 4에 나타내었다. Table 3은 대조기동안, Table 4는 소조기동안의 해수교환율이다.

Table 1. Salinity of ebb and flood flow at spring tide

Depth (m)	St.	A		B		C		D		E	
	S_E	S_F	S_E	S_F	S_E	S_F	S_E	S_F	S_E	S_F	
0	29.07	29.07	28.92	29.81	28.88	29.83	28.89	29.78	29.17	29.70	
2	29.05	20.45	20.02	29.32	28.85	29.49	28.86	29.49	29.01	29.45	
4	29.52	29.61	29.45	29.46	29.36	29.46	29.40	29.63	29.51	29.53	
6	29.51	29.59	29.69	29.81	29.65	29.85	29.68	29.76	29.71	29.74	
8	29.56	30.07	30.01	30.08	30.06	30.18	30.02	30.07	29.97	30.08	
10	30.21	30.24	30.22	30.23	30.17	30.18	30.05	30.18	30.12	30.19	
12	30.27	30.30	30.17	30.27	30.12	30.13	30.12	30.12	30.14	30.18	
Bottom	30.47	30.48	30.38	30.42	30.28	30.35	30.33	30.35	30.33	30.38	

馬山灣의 海水交換率

Table 2. Salinity of S_E and S_F at neap tide

Depth (m)	St. A		B		C		D		E	
	S_E	S_F	S_E	S_F	S_E	S_F	S_E	S_F	S_E	S_F
0	19.10	19.98	19.86	30.68	20.49	20.65	20.43	21.20	20.14	20.44
2	22.83	23.19	26.75	28.05	,	,	,	,	24.89	25.23
4	28.41	28.49	29.68	29.93	27.86	28.10	28.13	29.11	28.07	28.14
6	29.70	29.98	30.53	30.52	29.77	29.81	29.60	29.73	29.73	30.30
8	30.38	30.76	30.66	31.01	30.58	30.77	30.54	30.60	30.50	30.60
10	30.97	31.07	31.22	31.30	30.97	31.03	31.01	31.14	30.88	31.10
12	31.20	31.46	31.45	31.52	31.18	31.30	31.15	31.21	31.18	31.27
Bottom	31.48	31.60	31.45	31.52	31.44	31.88	31.43	31.54	31.44	31.50

Table 3에서 보던 全水深에 대한 평균교환율은 γ_0 3.8~8.7%, γ_B 6.9~11.7%, γ_C 2.4~5.4%이다. Table 4에서는 평균교환율이 γ_0 4.1~9.0%, γ_B 5.2~9.1%, γ_C 2.0~4.9%이다. 여기서 Parker *et al.* (1972)에 의한 교환율 γ_0 를 다른 곳과 비교해보면 광양만 16~22%(朴, 1984)와 진해만의 가덕수도 1~15%, 견내량수도 17~24%(金, 1984) 및 대조기 동안의 거제만 13~27%(金, 1985)인데 비하여 마산만은 이들의 1/3~1/4 정도로서 交換이 상당히 적게 일어남을 알 수 있다.

交換率을 水深別로 보면, 大潮期는 表層 0~2 m에서 交換率이 最大 38%로서 크게 나타났다. 小潮期는 中層 4~6 m에서 最大 26%의 交換率을 보였다. 이것은 강수량이 없는 전기동안은 조석에 의한 交換이 表層을 통하여 활발하게 이뤄지고 있으나, 우기동안은 담수가 表層을 통하여 流出되고 底層을 통하여 灣內로 流入되고 있다. 따라서, 2~4 m層에서 염분약층이 뚜렷하게 형성되고 흐름의 2중구조를 가지므로서, 連行加入이 왕성하여 密度流에 의한 對流現象이 4~6 m層에서 활발함을 알 수 있다.

Table 3. Tidal exchange ratio(%) of r_0 , r_B and r_C at Spring tide

Depth (m)	St. A			B			C			D			E		
	r_0	r_B	r_C	r_0	r_B	r_C	r_0	r_B	r_C	r_0	r_B	r_C	r_0	r_B	r_C
0	2	2	1	21	31	14	31	34	19	31	32	19	16	38	13
2	14	16	8	10	13	6	21	25	13	21	25	13	12	38	10
4	3	4	2	0	0	0	3	4	2	5	5	3	1	2	1
6	3	3	2	5	4	2	8	7	4	3	3	2	1	2	1
8	5	4	2	2	2	1	2	4	1	2	2	1	4	6	3
10	2	12	2	1	4	1	1	6	1	6	12	4	3	3	2
12	1	10	1	4	10	3	1	8	1	0	0	0	2	2	1
Bottom	0	2	1	2	9	2	3	2	1	1	6	1	2	3	1
Mean	3.8	6.6	2.4	5.6	9.1	3.6	8.7	11.2	5.2	8.6	10.6	5.4	5.1	11.7	4.0

Table 4. Tidal exchange ratio(%) of r_0 , r_B and r_C at Neap tide

Depth (m)	St. A			B			C			D			E		
	r_0	r_B	r_C	r_0	r_B	r_C	r_0	r_B	r_C	r_0	r_B	r_C	r_0	r_B	r_C
0	10	12	6	10	10	5	2	2	1	11	9	5	4	4	2
2	4	4	2	-	9	-	-	0	-	11	0	-	5	3	2
4	2	1	1	25	2	2	6	2	2	26	6	5	2	1	7
6	13	14	7	12	1	1	2	2	1	1	8	1	26	24	14
8	9	7	4	1	4	1	9	7	4	2	2	1	-	10	-
10	6	9	4	7	6	3	4	6	2	8	10	5	12	11	6
12	17	18	10	6	5	3	8	9	4	4	5	2	6	7	3
Bottom	10	8	5	6	5	3	2	14	2	9	7	4	4	4	2
Mean	8.2	9.1	4.9	8.4	5.2	2	2	4.1	5.2	2.0	9.0	5.9	7.4	8.0	4.5

또한 交換率이 潮差에 따라서 변하는 정도를 보면, San Francisco灣(Parker *et al.*, 1972)의 交換率은 潮差 3.3ft 일때 γ_0 가 17~18%, 5.8ft 일때 31~56% 여서 潮差 또는 tidal prism에 거의 비례하여 증가하였다. 단, 成層이 弱한 경우의 값이다. 東京灣에서도 γ_0 는 거의 조차에 비례하였다(Mastumoto, 1975). 또, 光陽灣의 경우, γ_0 는 潮差에 비례하였으며 강수량이 많고 潮差가 작은 시기에는 큰 값을 보였다(朴, 1984). 馬山灣의 경우, γ_0 는 大潮期 1.87m 일때 3.8~8.7%이고 小潮期 0.91m 일때 4.1~9.0%로서 潮差에 상관없이 거의 같은 값을 보인 바, 이는 光陽灣의 경우 소조기와 그 現象이 유사하게 나타나고 있으나, 이런 관계를 좀더 명확히 하기 위해서는 보

다 長期的인 資料에 의해 파악할 必要가 있다.

한편, γ^0 , γ_B 및 γ_G 간의 相關을 보면 (Fig. 5 및 6) 大潮期(Fig. 5)는 γ_0 와 γ_G 가 相關係數 0.988이며 γ_B 와 γ_G 가 0.925로서 各 方法간에 相關性이 아주 높다. $\gamma_G = (\gamma_0 + 0.05)/1.56$, $\gamma_G = (\gamma_B - 1.75)/1.97$ 로서 γ^0 와 γ_B 에 관한 交換率 $\gamma_G = 0.32 \gamma_0 + 0.25 \gamma_B - 0.428$ 의 관계가 成立된다. 小潮期(Fig. 6)의 γ_0 와 γ_G 는 相關係數 0.601, γ_B 와 γ_G 의 相關係數 0.693으로서 $\gamma_G = (\gamma_0 - 2.753)/1.386$ 이고 $\gamma_G = (\gamma_B - 2.437)/1.223$ 에서 γ_0 와 γ_B 의 관계는 $\gamma_G = 0.36 \gamma_0 + 0.409 \gamma_B - 2.011$ 이 成立된다. 따라서 大·小潮期는 $\frac{1}{\gamma_0} = \frac{1}{\gamma_B} + \frac{1}{\gamma_G} - 1$ 의 관계와 유사한 값을 나타내고 있어

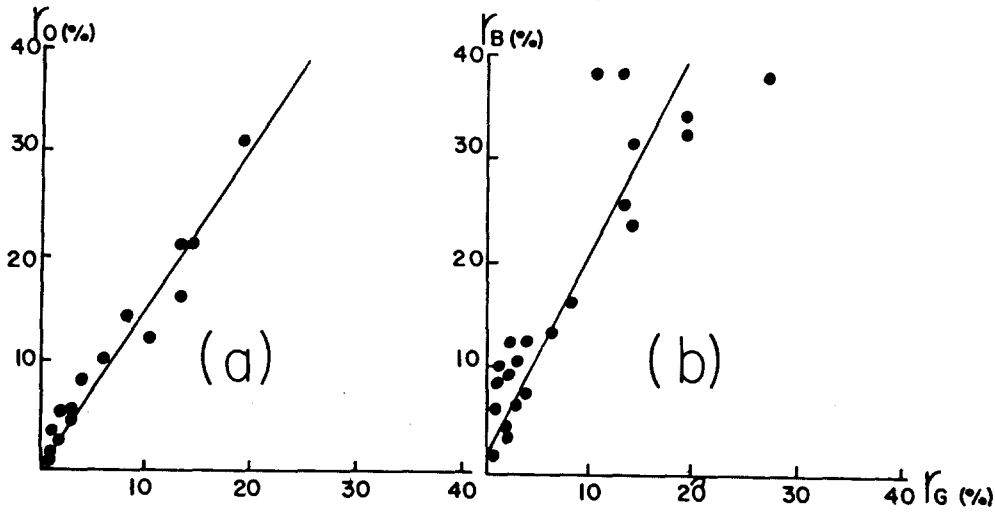


Fig. 5. Relation between r_0 and r_G (a), r_B and r_G (b) at spring tide.

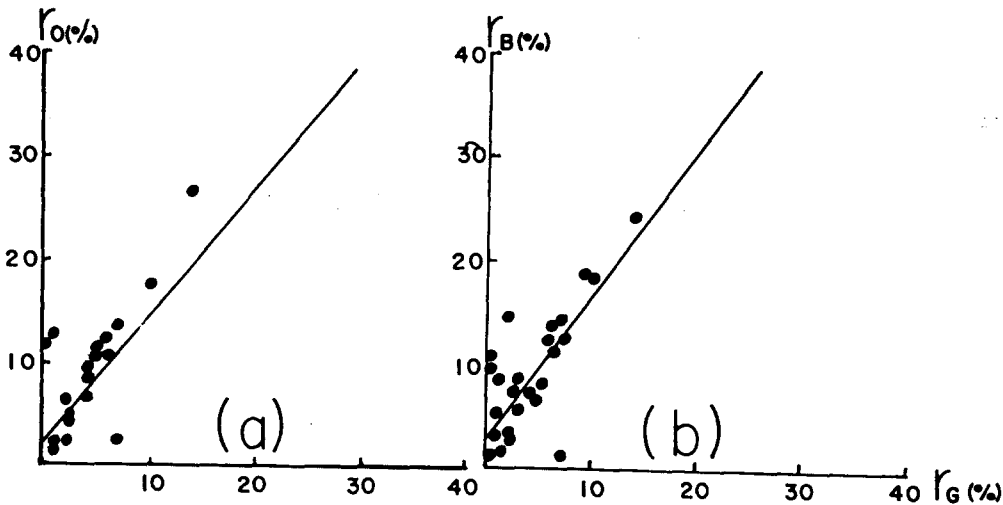


Fig. 6. Relation between r_0 and r_G (a), r_B and r_G (b) at neap tide.

馬山灣의 海水交換率

宇野木(1978, 1980)의 報告에 의한 $\gamma_G \approx \frac{1}{2} \gamma_0$ 와 같
일치한다.

要 約

夏季 大·小潮期에 馬山灣의 海水交換特性을 검토
· 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 馬山灣의 海水交換率은 海水교환개념에 따라
각각 다르다, 大潮期 2.4~11.7%, 小潮期 2.0~9.1
%의 분포를 보임으로서 대체로 10%미만의 적은 값
을 나타냈다.

2. 일반적으로 海水교환율은 潮差에 비례하여 변
동되나, 馬山灣의 交換率은 거의 같은 값을 보였다.
潮差가 적은 경우라도 成層이 강한 때는 交換이 활
발한 것으로 추정된다.

3. 交換率 γ_0 와 γ_G 의 相關係數는 大潮期 0.988
小潮期 0.601이며, γ_β 와 γ_G 의 相關係數는 大潮期
0.925, 小潮期 0.693이다. 交換率 γ_0 , γ_β 및 γ_G 의
相關式은 大潮期 $\gamma_G = 0.32 \gamma_0 + 0.25 \gamma_\beta - 0.428$, 小
潮期 $\gamma_G = 0.36 \gamma_0 + 0.409 \gamma_\beta - 2.011$ 로 나타으며 이들
은 $\frac{1}{\gamma_G} = \frac{1}{\gamma_0} + \frac{1}{\gamma_\beta} - 1$ 과 $\gamma_G \approx \frac{1}{2} \gamma_0$ 를 거의 만족시키
고 있다.

금후 계절적 및 장기적 관측자료를 필요로 하며
이를 토대로 수질오염예측을 가능케 할 것이다.

文 獻

川村雅彦의 4인(1975): 豊後水道の海況と擴散係數.
海と空, 50, 43-58.

金鍾萬·韓相俊·李鍾華(1976): 馬山灣의 環境學的
研究 1. 物理的 特性과 化學成分含量에 對하
여. 韓海誌, 11-1, 25-33.

金鍾華 (1984): 嶺海灣의 海水交換. 釜山水大 碩士
學位論文.

金鍾華·張善德 (1985): 巨濟灣의 海水交換·韓水誌,
18(2), 101-108.

金鍾華·張善德·金三坤(1986): 馬山灣의 海水流動
에 關하여. 韓水誌 19(3), 274-280.

國立環境研究所(1982): 全國主要沿岸水質調查報告書.
環境廳 3~279.

李明哲·張善德(1982): 靑莫灣의 海水交換. 韓海誌
17(1), 12-18.

Makoto Kashiwai (1984): The Concept of Tidal
Exchange and the Exchange Ratio Jour.
Oceanogr. Soc. Japan 40, 135-147.

南基洙(1982): 馬山灣의 淡水交替時間. Bull.
KORDI 4, 1-10.

朴光淳(1984): 光陽灣 灣口를 통한 海水交換. 釜山
水大 碩士學位論文.

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.

Matsumoto Teruhisa(1975): Sea Water Exchange
at Tokyo Bay mouth. Coast. Eng. Japan
18.

宇野木早苗(1978): 内灣における海水の交換. 海洋科
學, 10, 821-830.

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.