

# 馬山灣의 海水流動에 關하여

金鍾華·張善德·金三坤

釜山水產大學  
(1986년 2월 25일 수리)

## Variability of Current Velocities in Masan Inlet

Jong-Hwa KIM, Sun-duck CHANG and Sam-Kon KIM

National Fisheries University of Pusan, Pusan 608, Korea

(Received February 25, 1986)

Velocity variability of Masan Inlet in the northern part of Chinhae Bay is studied on the basis of the cross-sectional net velocity distributions and its root-mean-square. They were calculated during three consecutive cycles at spring tide as well as two cycles at neap tide with precipitations in June and July 1985.

During the spring tide, net ebb flow take place in the western channel while net flood flow in the eastern channel of the cross-section. On the contrary, the direction of both net flows during the neap tide with precipitations is reversed.

R.M.S. isotachs show that the highest velocity is 15 cm/sec at spring tide and 10.3 cm/sec at neap tide, and the greatest velocity is persistently found at the surface layer of the western channel of the cross-section at each tidal cycle.

It is shown that the major part of constituents of the constant flow in the Inlet is the tidal residual current. The density-driven current, however, plays an important role after the heavy precipitations.

### 緒 論

馬山灣은 진해만의 북단에 위치하는 內灣으로서, 표면적이 작고(약 15 km<sup>2</sup>) 남북길이는 약 8.5 km 이며 만구폭은 약 1 km 에 불과한 閉鎖性 小灣이다. 평균 수심은 약 10m 에 불과하여 해수량도 작은 편이다.

마산만 인근에 있는 마산 및 창원시의 都市廢水와 마산 시내 및 창원공단의 많은 産業廢水가 유역 河川을 통해서 마산만으로 流入된다. 이들 도시 및 산업 폐수는 마산만을 甚하게 汚染시킬 뿐만 아니라, 진해만까지 오염시켜서 赤潮發生 原因으로 알려져

있다.

이 마산만과 진해만에 대해서는 국립수산진흥원이 海水汚染 指標와 적조에 관한 기초자료를 얻기 위하여 수온, 염분 및 COD 등의 海洋要素를 정기적으로 조사하고 있다.

또한 마산만을 포함한 嶺海灣 전체의 海水流動에 관하여는 李等(1974), 金等(1976), 林等(1979), 張等(1984), 그리고 Chang and Yanagi(1986)의 연구가 있다.

그런데 馬山灣에 대해서는 담수교체시간에 관한 南(1982)의 보고가 있으나 馬山灣의 海水流動에 관한

연구 결과는 찾기 어려운 실정이다.

본 연구에서는 汚染現象이 비교적 심한 6~7월에 內灣水와 外灣水가 접하는 馬山灣 灣口에서 연속측류 자료를 사용하여 鉛直橫斷面의 流速構造變動을 밝히고 灣口를 통한 海水流出入量을 구명하고자 한다.

資料 및 方法

마산만의 해수유동을 조사하기 위하여 大潮期인 1985. 6. 4~6일과 小潮期인 7. 12~14일에 만구의 폭 1.6 km 인 횡단면상에 동일간격으로 5개 정점을 정하여(Fig. 1 및 Fig. 2) 流速·水溫·鹽分 및 水深을 측정하였다. 부산수산대 실습선 부산 403호와 소형선 2척을 동원해서 rotor 형 유속계(TSV-2)와 digital 형 염분계(TDS-7)를 사용하여 대조기 47시간, 소조기 39시간 동안 表層에서 底層까지 2 m 간격으로 每 時間마다 측정하였다.

본 연구에서는 이들 측정자료중 연속된 대조기 37시간(3조석주기)과 소조기 25시간(2조석주기)의 자료를 이용하였다. 조석에 의한 水深補正을 위하여 매 시간별로 2회씩 측정한 값을 平均한 水深을 구하여 사용하였고, 鉛直斷面의 海底地形은 측정수심에 조석보정을 실시한 자료와 해도수심을 보충하여 마련하였다. 流量計算에는 단면 직각방향의 유속값을 구하고 단면 유속의 同時性을 갖기 위하여 각 정점의 시간별 유속값을 내삽하여 보정하였다.

평균수심으로 나타낸 실측단면을 Fig. 2 와 같이 나타내었다. 여기서 만구 연직단면의 관측점을 중심으로 等間隙의 小區間을 생각한다. 횡단면 정점  $s=1, 2, \dots, l$ , 정점의 수심  $d=1, 2, \dots, m$ , 관측시간  $t=1, 2, \dots, n$ , 어느 시간의 소구간의 순간 단면적을  $a(s, d, t)$ , 소구간의 순간 유속을  $v(s, d, t)$ 라 하면, 小區間의 平均 斷面積  $\bar{a}$ 는 아래식으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{a}(s, d) = \frac{\sum_{t=1}^n a(s, d, t)}{n} \quad (1)$$

또 平均斷面積의 합  $\bar{A}$ 는

$$\bar{A} = \sum_{s=1}^l \sum_{d=1}^m \bar{a}(s, d) \quad (2)$$

각 수심별 平均 流速  $\bar{V}$ 는

$$\bar{V}(s, d) = \frac{\sum_{t=1}^n v(s, d, t)}{n} \quad (3)$$

그러나, 潮差가 平均水深에 대하여 차지하는 比率이 클 경우  $a(s, d, t)$ 와  $\bar{a}(s, d)$ 는 크게 달라진다. 海水面으로부터 동일 수심층의 유속을 측정하더라도 시간에 따라 水深變動이 있으므로 측정 수심층도 상대적

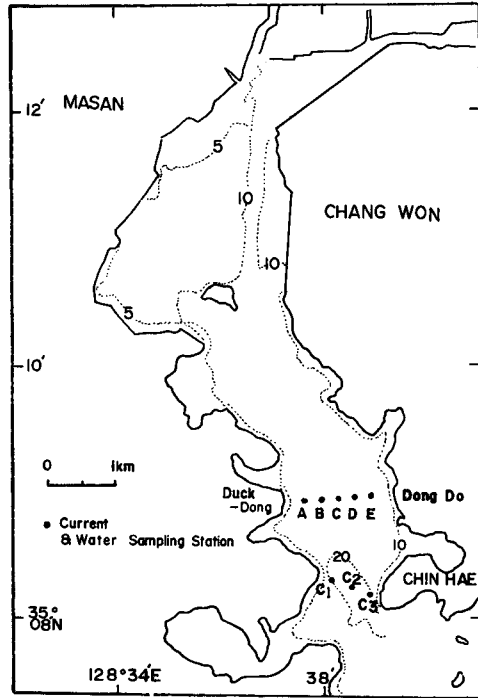


Fig. 1. Bathymetry and oceanographic stations in Masan Inlet.

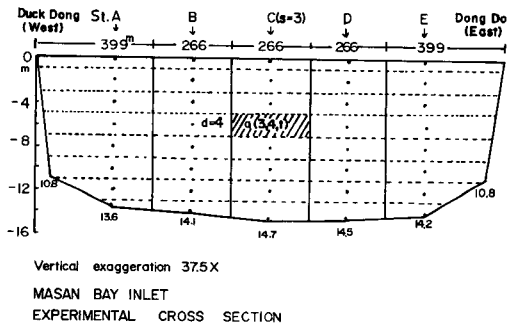


Fig. 2. Experimental cross-section at mean tide showing station notation, horizontal distance (m) of each section, time-averaged water depths (m) at each station, and schematic diagram of a subsection in Masan Inlet.

으로 변할 것이다. 따라서, 연직단면에 等流速線을 정확하게 그리기 위하여, 수심변동을 고려하여 유속값을 구하여야 할 것이다(Kjerfve, 1975, 1984).

그러므로, 단면의 수심에 대한 潮差를 고려하여 평균유속과는 다른 純流速(net velocity)의 개념을 도입한다.

純流速  $\bar{V}_n$  은

$$\bar{V}_n(s, d) = \frac{\sum_{t=1}^n v(s, d, t) a(s, d, t) / n \cdot \bar{a}(s, d)}{\quad} \quad (4)$$

가 된다. 또 단면유속의 세기를 알기 위하여 순간유속  $v(s, d, t)$ 의 root-mean-squared deviation,  $D_{rms}$ , 를 다음과 같이 구하였다.

$$D_{rms}(s, d) = \left[ \frac{\sum_{t=1}^n \{v(s, d, t) a(s, d, t) - \bar{a}(s, d) \bar{V}(s, d)\}^2 / \{(n-1) \bar{a}^2(s, d)\}} \right]^{1/2} \quad (5)$$

단면의 순간 통과유량  $Q$  는

$$Q = \sum_{s=1}^n \left[ \sum_{d=1}^m a(s, d, t) v(s, d, t) \right] / n \quad (6)$$

으로 계산하였다.

## 結果 및 考察

### 1. 最强流速

#### 1.1. 大潮期

대조기 및 소조기의 最强 유속시간을 택하고 측정 단면에 直角方向의 유속성분을 구하여 Fig. 3에 나타내었다. 왼쪽은 대조기, 오른쪽은 소조기이며, 윗쪽 단면은 창조류이고, 아래 단면은 낙조류이다. 대조기의 창조류 최강유속은 고조전 3시에, 낙조류 최강유속은 고조후 3시에 일어났다.

창조류의 最强流速은 수도 중앙부인 정점 C의 표층에서 24 cm/sec이며, 표층에서 3m 층 사이에 유속의 不連續層이 형성된다. 또 수도의 서부 정점 A의 12m 층에서 流軸을 형성하며 中心流速이 6.6 cm/sec 를 나타낸다.

그러나, 대부분의 단면에서는 수심 4m 이심에서 유속이 매우 弱하여 0~2 cm/sec이다. 정점 A의 중층에서 중심유속이 2 cm/sec 인 약한 逆流가 있다.

낙조류의 최강유속은 정점 B의 상층(2m)과 하층(12m)에서 각각 17~18 cm/sec로서 잘 발달된 유속을 형성하고 있다. 이때 서부 정점 A의 표층에서 15 cm/sec의 강한 逆流가 마산만 내부쪽으로 流入되었다. 또 단면 전체의 유속은 창조때 보다 큰 값을 나타내었다.

#### 1.2. 小潮期

Fig. 3에서 창조류는 灣中央部 C점의 2~3m 층 및 底層에서 流軸을 나타내고, 최강유속이 9 cm/sec이다. 단면 전체의 흐름은 4m 이심에서 매우 약하며 2 cm/sec 이내이다. 逆流는 정점 A, D 및 E의 표층 0~4m에서 유속의 뚜렷한 不連續層을 형성하며, 최강유속은 17 cm/sec이다.

낙조류는 정점 B와 C間的 표층에서 유속을 형성하고 중심유속이 17 cm/sec이며, 4m 이심에서는 대체로 2 cm/sec 이하의 느린 속도로 유출되었다. 정점 A의 2m 이심을 포함한 단면의 저층에서는 흐름이 없는곳을 많이 볼 수 있다. 역류는 B점의 저층에서 최고 2.5 cm/sec에 불과하다.

따라서, 대조기의 경우 창조류가 4m 이하의 표층을 통해서 최강유속으로 유입되며, 낙조류는 정점 B의 표층과 저층에서 잘 발달된 유속을 형성한다. 강수 직후의 소조기는 정점 B의 4m 이하의 표층을 통해서 주로 유출된다. 최강 유속 시간일에도 불구하고, 흐름이 미약하거나, 정지된 흐름을 4m 이심에서 많이 볼 수 있고, 장소에 따라 만구 가장자리의 상층에 역류가 존재한다.

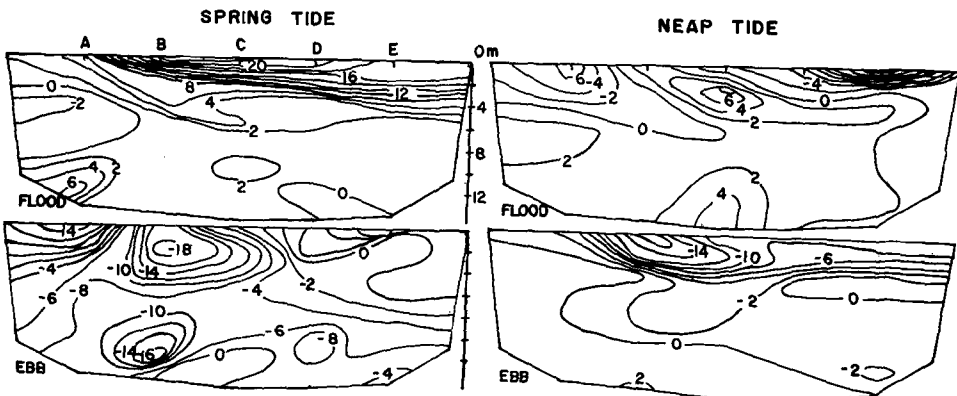


Fig. 3. Isopleths of longitudinal velocities in cm/sec at the cross-section at spring tide (left) and neap tide (right) in Masan Inlet.

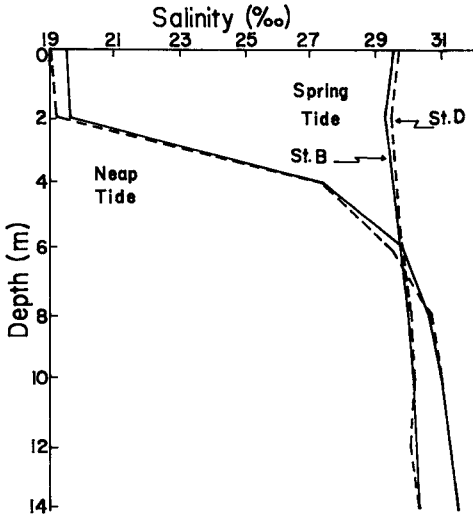


Fig. 4. Salinity profiles at the cross-section in Masan Inlet.

단면 정점 B와 D의 鹽分構造를 나타낸 Fig. 4에서 보면, 대조기는 염분값이 29.6~30.3‰로서 표층과 저층이 거의 균一하여 상하층의 流速差가 적거나 同一方向의 흐름이 있음을 알 수 있다. 소조기의 염분값은 0~2 m 사이에서 19~19.5‰로 균일하나 2~4 m 사이에 鹽分 躍層이 있고 4 m에서 27.3‰, 6 m

이심에서는 29.6~31.5‰로서 거의 균일하다. 이것은 4 m 이하의 표층에서는 淡水가 유출되고 6 m 이심 이하의 저층에서는 外海水가 유입하는 흐름의 2중구조를 나타내는 현상을 시사한다.

## 2. Net velocity

대조기와 소조기의 실측단면에서 net velocity의 等值線을 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 net velocity  $\bar{V}_n$ 은 식(4)를 이용하여 한 조석주기 동안에 창조기의 net velocity  $\bar{V}_{nf}$ 와 낙조기의 net velocity  $\bar{V}_{ns}$ 의 차를 측정시간 수로 나누어 cm/sec로 나타내었다. 이때, 유속이 灣으로 향하면 +, 灣外로 향하면 -로 하였다. 그림에서 왼쪽의 3 조석 주기는 강우량이 없는 대조기 동안, 오른쪽의 2 조석 주기는 강우량이 있는 (2일 간에 30.6 mm) 소조기 동안의 net velocity이다. 그림을 보면, 無降雨 대조기는 net velocity의 最大 流出速度가 첫째 조석주기에 만구 서부 A점의 4 m 층에서 -6.1 cm/sec였고, 最大 流入速度는 셋째 조석주기의 수도 중앙부 C점의 표층에서 9.5 cm/sec이다.

이와는 반대로 비가 왔던 소조기는 수도의 中央과 東部에서 유출 유속이 커서 net velocity의 최대값은 첫째 조석 주기의 중앙부 C점의 2 m 층에서 -8.2 cm/sec이며 유출을 형성하고 있으나, 유입 유속은 매우 약하며 최대 유입속도는 1.4 cm/sec에 불과하고 2조

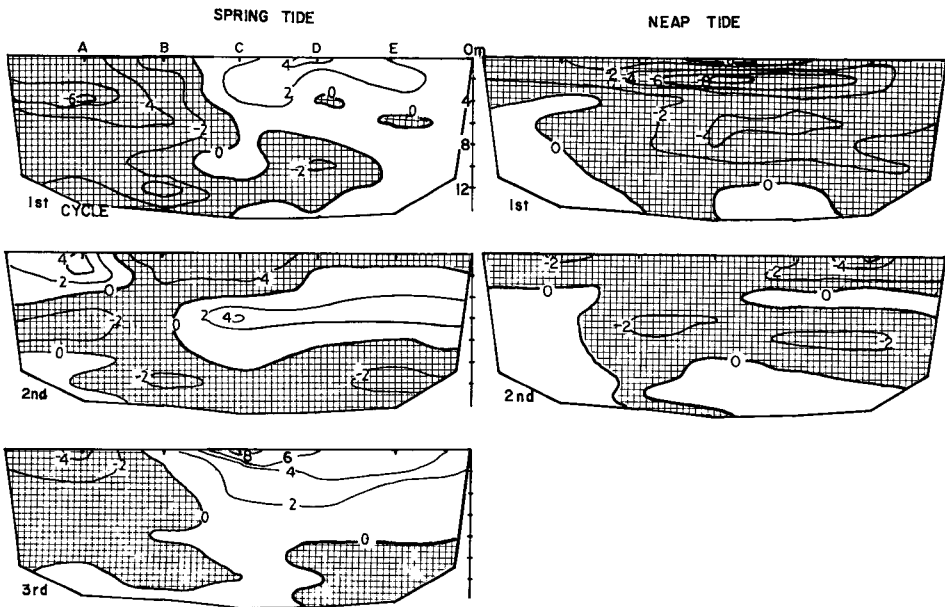


Fig. 5. Isoleths of net longitudinal velocities in cm/sec at the cross-section for each of the five tidal cycles in Masan Inlet at spring tide; 16:00 June 4~04:00 June 6, 1985 and neap tide; 22:00 July 12~22:00 July 13, 1985.

석주기 모두 단면 A점의 4m 이십인 중·하층과 C, D, E점의 하층에서 유입된다. 마산만구의 실측단면에서 대조기에 비가 오지 않은 경우는 순유출이 斷面 西部를 통하여 이루어 짐을 알 수 있다.

소조기에 강수가 있는 경우에는 이와 반대로 순유출이 단면 동부의 중·상층에서, 순유입은 서부의 하층을 통해 이루어진다.

잘 혼합된 河口域에서 깊고 얇은 2층의 단면지형을 가질 경우, Kjerfve et al(1979)는 South Carolina의 North Inlet에서 대조기 동안 얇은 부분에서 순유입이 있고, 깊은 부분에서는 순유출이 우세함을 밝혔고, 수평순환 현상이 명백히 존재한다고 하였다.

그러나, 마산만의 河口域은 Fig. 6의 成層循環圖

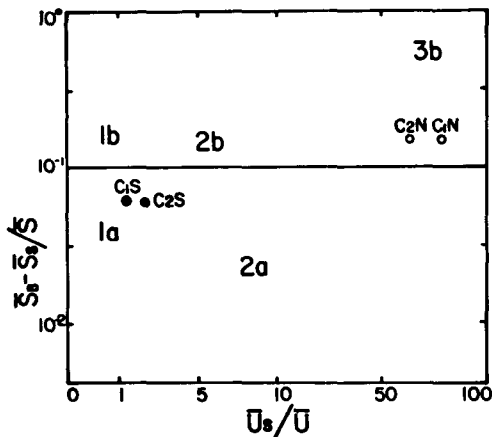


Fig. 6. Stratification-circulation diagram at the entrance of Masan Inlet.

와 같이, 대조기에는 IA와 IB의 중간형태이고, 降雨後의 소조기에는 3B에 속하여 弱混合形-成層型의 특성을 보인다. 또 Fig. 2에서 평탄한 해저지형을 이루고 있음을 알 수 있다.

따라서 부분적 성층과 평탄한 해저지형을 지닌 마산 만구의 실측단면에서의 순유출입은 대 조석주기마다 거의 일정한 위치에서 이루어 진다. 또 비가 오지 않은 대조기와 비온 직후의 소조기는 순유입과 순유출의 위치가 서로 다른 것을 알 수 있다.

### 3. Root mean square 速度

Fig. 7은 RMS等量線을 나타낸 것이다. 대조기는 3 조석주기 모두 거의 同一位置, 즉 단면 서부의 표층에서 지속적으로 최대값을 보인다. 최대값의 peak는 셋째 주기인 단면 서부의 표층에서 나타나서 15.0 cm/sec였다.

소조기에도 최대값이 둘째 주기의 서부 표층에서 10.3 cm/sec이지만, 첫째 주기만이 동부의 표층 가까운 곳에서 9.3 cm/sec를 나타내었다.

RMS 速度의 세기, 특히 잘 혼합된 하구역에서 peak 속도의 단면분포는 만구 부근의 해안선 형태와 해저 지형 및 섬 등에 의하여 달라질 것이다. 즉 물질흐름(material flux)의 계산에서 분산속도는 단면에서 일정하다고 간주 할 수 없다(Kjerfve, 1979). 그러나 마산만구는 부분적 성층상태를 이루는 하구역이며 Fig. 7에서와 같이 RMS 速度의 최대 세기는 대조기 11.3~15.1 cm/sec 소조기 7~10.3 cm/sec로서 약간 변동이 있으나, 그 흐름의 主軸은 西쪽 水道의 表層에 있음을 알 수 있다.

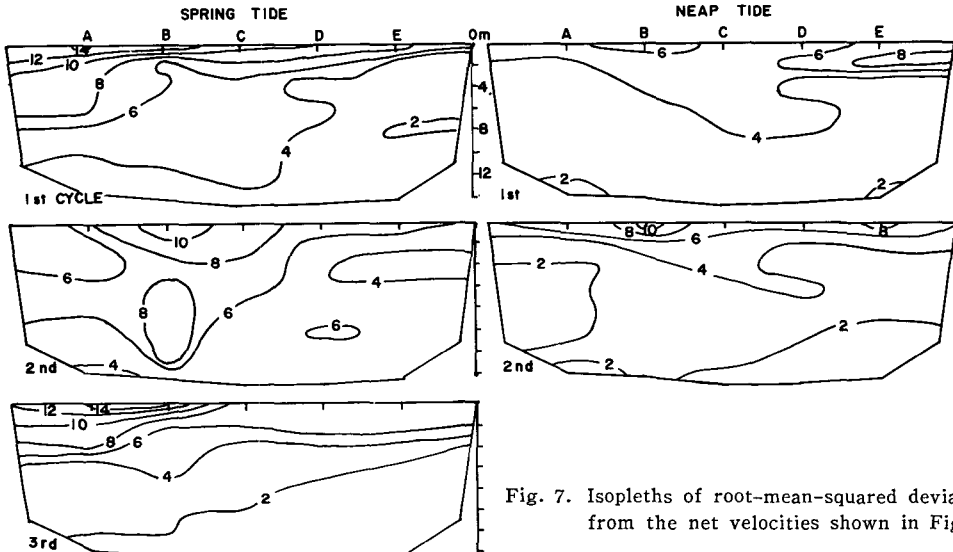


Fig. 7. Isopleths of root-mean-squared deviations from the net velocities shown in Fig. 5.

4. 斷面 通過流量

식(6)에 의한 매 시간별 단면의 通過流量과 水位變化를 Fig. 8 에 나타내었다. 이 그림에서 나타난 현상은 流量曲線과 潮汐曲線의 位相差는 3~4 시간이다. 조석곡선은 거의 대칭적이고, 소조기는 다소 진동이 있다. 유량곡선은 비대칭적이다. 유량곡선의 振幅은 대조기의 경우 유입시 보다 유출시에 약간 크다. 소조기는 유출시의 진폭이 유입시보다 현저하게 크다.

관측기간 동안 창, 낙조시의 조차와 밀물과 썰물의 통과유량 계산 결과는 Table 1 과 같다. 순 통과유량은 식(6)을 사용하여 한 조석주기 동안 창조기 유량과 낙조기의 유량과의 차로써 나타내었으며, 만

으로 流入된 유량을 +, 流出된 유량을 -로 하였다. 平均潮差는 대조기 1.87 m, 소조기 0.91 m 였다. 순간의 최대 유입 및 유출량은 모두 둘째 주기에서 각각 851 및 -130 m<sup>3</sup>/sec 였다. 純 流出量은 대조기의 경우, 둘째 주기에 -109 m<sup>3</sup>/sec 이고, 소조기에는 -202 m<sup>3</sup>/sec 였다. 純 流入量이 있는 주기는 셋째로서 26 m<sup>3</sup>/sec 였다. 순 통과유량의 평균은 대조기 -39.7 m<sup>3</sup>/sec 소조기 -170 m<sup>3</sup>/sec 이다. 건기인 대조기 보다 우기인 소조기에 순 유출량이 현저히 많은 원인은 降雨로 인한 淡水流入量 增加에 기인하는 것이며(Fig. 4), 대조기에는 潮差에 따라 變動한다.

恒流는 해류와 조류에 의한 潮汐殘差流, 하천수 유입에 의한 密度流, 바람의 작용에 의한 吹送流 및 기타로 나누어서 생각할 수 있다(Yanagi, 1980). 마산만에 대하여 恒流의 成分을 계산한 결과는 Table

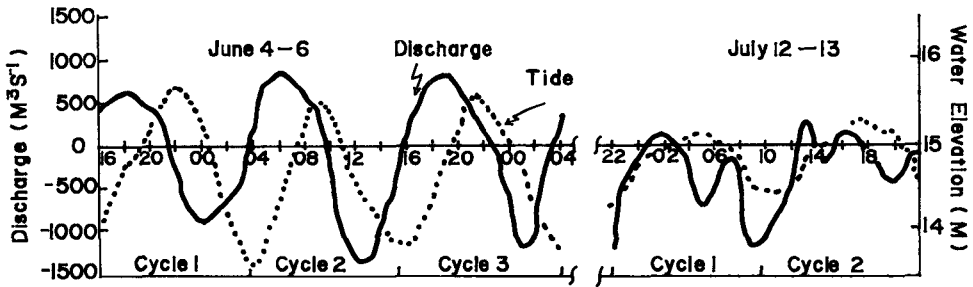


Fig. 8. Time variation of instantaneous cross-sectional discharge and sea level.

Table 1. Comparison of tidal range, flow rates and tidal prism for the five tidal cycles. Positive discharge denotes the landward flow and negative the seaward flow

Item	Tidal cycles at spring			Tidal cycles at neap	
	1	2	3	1	2
Tidal range, rising(m)	1.70	2.05	1.75	0.85	0.85
falling(m)	2.20	1.70	1.80	0.65	1.30
Max. flow rate, flood(m <sup>3</sup> /sec)	502	851	849	127	258
ebb(m <sup>3</sup> /sec)	-903	-1370	-1248	-1031	-800
Volume of tidal prism, flood(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	11.28	14.44	13.36	2.65	3.81
ebb (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	-12.88	-19.26	-12.19	-11.63	-10.0
Net flow*(m <sup>3</sup> /sec)	-36	-109	26	-202	-138

\*Difference between flood and ebb flow during one tidal cycle.

Table 2. Comparison of spring and neap tide for volume of tidal prism and constituents of constant flow

Volume of flow	Spring tide	Neap tide with precipitations
Tidal prism	27.80 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	14.04 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Constant flow	1.76	7.65
Tidal residual flow	1.05	1.65
Deduced run-off	0.71	5.70

2와 같다. 평균조차로부터 潮流量을 계산하고, 순 통과유량으로부터 항류를 계산하였다. 이때 바람과 기타의 영향은 고려하지 않았다.

Table 2에서 보면 대조기 강우량이 없는 경우에 조석간차류량이 하천수 유입량의 약 1.5 배이고, 강우량이 있는 경우는 조석간차류량이 하천수 유입량의 약 1/3에 불과했다. 즉, 염분이 낮고 담수유입이 많아도 대조기에는 潮汐作用(tidal pumping)이 만내 외의 유입 유출을 지배하며, 소조기에 강우량이 많은 경우에는 담수량이 매우 강하게 작용함을 알 수 있다. 따라서 마산만의 항류는 강우량이 없는 경우는 潮汐殘差流가 우세하나 小潮期에 강우량이 있는 경우는 密度流가 우세함을 알 수 있다.

### 要 約

대, 소조기에 馬山灣에서 連續觀測한 자료를 사용하여 灣口 斷面의 流速 變動特性을 구명하기 위하여 net velocity와 RMS 速度의 等量線 및 純 流出入量을 계산하여 검토하였다.

最強流速은 水道 中央과 西部의 4 m 이하의 表層에서 나타나고, 최대 유입속도 24 cm/sec 최대 유출속도는 15 cm/sec 이다. 최강유속 시간임에도 불구하고 4 m 이십에서는 유속이 약하여 0~2cm/sec 에 불과하다. 만구 단면의 가장자리의 上層에 逆流가 存在한다.

net velocity는 비가 오지 않은 대조기의 경우 유출유속은 灣口斷面 西部에서 나타나며, 유입유속은 단면 東部에서 나타난다. 비온 직후의 소조기에는 이와 정반대로 흐른다.

RMS 速度의 최대 세기는 대조기에 11.3~15.0 cm/sec, 소조기에 7~10.3 cm/sec 로서 단면 西部의 表層에 있으며, 매 조석주기마다 거의 同一位置에서 계속 존재한다.

純 通過流量은 건기에  $-39.7 m^3/sec$ , 우기  $-170 m^3/sec$  로서 유출이 탁월하다. 恒流成分은 건기에는 潮汐殘差流가 우세하지만, 小潮期의 降雨時에는 密度流가 우세한 것으로 추리된다.

### 文 獻

- 張善德 · 李文沃 · 金鍾華 · 朴光淳 · 金福起 · 林琦璋. 1984. 鎭海灣 東部 海域의 海水流動. 水振報 32, 7-23.
- Chang, S. and T. Yanagi. 1986, Water Circulations in Chinhae Bay. Summary Report, J. Oceanogr. Soc. Japan. 325-326.
- 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하여. 韓海誌 11(1), 25-33.
- Kjerfve, B. 1975. Velocity averaging in estuaries characterized by a large tidal range to depth ratio. Est. Coastal Mar. Sci. 3, 311-323.
- Kjerfve, B., and J. A. Proehl. 1979, Velocity variability in a cross-section of a well-mixed estuary. J. Mar. Res. 37, 409-418.
- Kjerfve, B., and H. E. Seim. 1984, Construction of net isopleth plots in cross-sections of tidal estuaries, J. Mar. Res. 42, 503-508.
- 李鍾華 · 奉鍾憲 · 韓相準. 1974. 鎭海灣의 海水流動에 關하여. 韓海誌 9(1-2), 19-30.
- 林斗柄 · 河晶植 · 金光弘 · 鄭淵秀. 1979. 여름철 鎭海灣의 海水循環. 統水專 論文集 14, 1-7.
- 南基洙. 1982, 馬山灣의 淡水交替時間. Bull. KO-RDI 4, 1-10.
- Yanagi, T. 1980, Variability of the Constant Flow in Osaka Bay. J. Oceanogr. Soc. Japan 36(5), 246-252.