

마산만의 汚染物質 수송에 미치는 바람 効果

金鍾華 ·李文沃* ·姜周復**

부산수산대학교 · 여수수산대학* · 부산대학교**

(1992년 11월 9일 접수)

Effect of the Wind on the Pollutant Transport in Masan Bay

Jong-Hwa KIM, Moon-Ock LEE* and Ju-Bok KANG**

National Fisheries University of Pusan, *Yosu National Fisheries University

**Pusan National University

(Received November 9, 1992)

Current measurements at 3 sections and numerical experiments were carried out in Masan Bay to understand the effect of the wind on the residual currents and pollutant transport.

The vertical distribution of horizontal velocities were directly affected by the wind at the depths of 1m and 2m beneath the sea surface. Analysis of the velocity data suggested that changes in the vertical gravitational circulation contributed to the net circulation. The net transport of water through the northern part of the bay was observed to be landward, with wind-induced transport of about 100m³/s. Hence, wind is concluded to be the dominant mechanism driving the net circulation in the northern area of Masan Bay.

Numerical experiments are shown that when S wind with 5m/s blew, northern area of the bay was generated the horizontal circulation of clockwise and local gyre. On the contrary of those, N wind made her to the anti-clockwise. In the case of no wind, the tidal residual current(constant flow) is very small or neglected except the bay-mouth. The inflow or outflow pattern of the mouth is considered as the flows generated by tidal residual current only. The distance of wind-induced transport of pollutant was as long as 2 times of no wind during the one tidal period.

1. 序 論

우리나라 연안漁場의 水質이 큰 사회문제로 떠 올린 지도 오래다. 이 때문에 연안 환경의 수질조사와 연구는 활발하게 행해져 왔

다. 연안어장중에서도 진해만은 그 오염도가 매우 심각하여 1981년부터 지난 11년동안 거의 매년 赤潮현상이 발생하며, 이로 인하여 어패류 등이 대량 폐사하고 있는 실정이다. 진해만내에서 가장 상습적으로 적조가 발생

하는 해역은 마산만과 행암만이며, 발생시키는 년도별로 큰 차이가 있으나 대규모 적조 발생시키는 여름철임이 밝혀졌다(황성처, 1991).

따라서, 진해만의 북단에 위치한 마산만은 폐쇄된 내만으로써, 진해만의 수질악화의 주된 원인을 제공하고 있음을 부인할 수 없다. 그러므로, 마산만의 수질을 보다 상세하게 파악하고 오염물질의 만내 移動經路와 그 범위를 추정함으로써, 해안공학적 水質改善 공법을 개발하는 데 기여 할 수 있을 것이다.

마산만의 해수순환에 관한 연구보고는 다년간 여러가지 각도로 발표되었다. 수산진흥원(1978)은 흐름의 수평적 분포로서, 밀물때는 돌섬(저도)을 중심으로 右旋渦流하고, 썰물때는 돌섬을 중심으로 좌선 와류현상이 나타남을 밝혔다. 해양연구소(1981)와 남(1982)은 유속과 염분의 연직 단면측정으로 부터 담수유입량을 계산하여, 만내의 담수교환체시간을 제시하였다. 지자 등(1986 a,b)은 만구의 단면관측에서 조석주기별 흐름의 층별변동을 파악하였고, 유속과 염분을 지표로 한 만내외수의 교환세기를 추정한 바 있다.

한편, 최근에는 Kang et al(1989)이 수치모델링을 이용하여 흐름의 水平分布와 하천수 유입유무에 따른 COD분포를 예측하였다.

그러나, 이들의 연구보고에서는 천해이며, 폐쇄된 내만에 영향을 미치기 쉬운 바람의 영향을 고려하지 않았다.

본 연구에서는 현장관측을 바탕으로, 오염물질 수송에 직접 기여하는 조석차차류와 오염의 指標인 BOD분포를 예측하고, 이들에 미치는 하천유량과 바람의 효과를 밝히고자 한다.

2. 調査方法

2.1 현장관측

1992년 7월의 대·소조기에 Fig.1처럼 3개 단면 11개정점에서 매시간단위로 총 6주기동안 유속, 염분, 수온, 수심 및 풍향풍속을 측정하였다. 단면별 관측시간은 Table 1과 같다. 사용된 선박은 부산수대 실습선 부산 403과 전마선 2척을 동원하였고, 측정기기는 CM-2 유속계(Toho Dentan Co., Japan)와 SCT 측정기(Model 33, YSI Co., U.S.A.)를 사용하였다. 각 정점위치는 정확한 간격과 위치를 유지하기 위하여 GPS(Global Positioning System)를 사용하였다. 각 정점의 층별 측정수심은 수면에서 연직방향으로 1 또는 2 미터 간격으로 하였다. 유속은 측정의 정도를

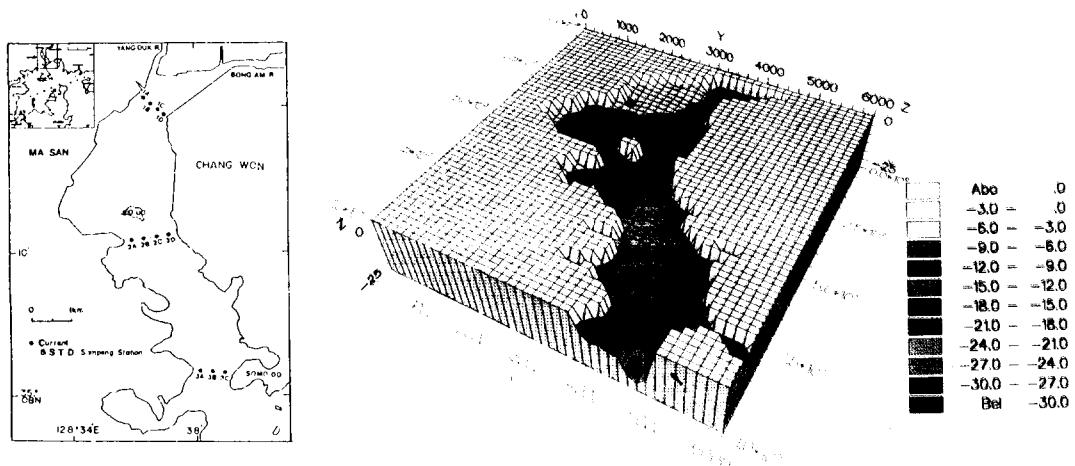


Fig. 1 Location map of hydrographic survey station(left) and bathymetric chart of study area (right).

Table 1. Details of the observations made in Masan Bay

Section	Date		Number of stations	Moon's age(day)		Wind(m/s)	
	Neap	Spring		Neap	Spring	Neap	Spring
1	04 : 00~16 : 35	07 : 00~18 : 30	4	6.6	15.6	SE	SSE
	7 July 92	16 July 92				5	3
2	18 : 00~06 : 30	16 : 00~04 : 30	4	6.6	14.6	SSE	SSE
	7~8 July 92	15~16 July 92		~7.6	~15.6	1	2
3	08 : 00~20 : 30	06 : 00~18 : 30	3	7.6	16.6	SE	S
	8 July 92	17 July 92				4.5	5

높이기 위해 각종 수심에서 40초동안의 평균 값을 읽었다. 그러나, 각 정점의 동시측정은 장비와 인력 및 측정비용을 고려하면 현실적으로 거의 어려운 실정이다.

따라서, 각 정점별 측정시간이 다르므로, Cubic spline 補間(Nakamura, 1991)과 조화분해를 행하고, 태음시로 환산하여 각 단면의 동시간 유속 및 수위를 구하였다.

2.2 수치실험

본 연구에 사용된 모델은 2차원으로 수심적분된 형태로서, 유체밀도가 일정한 것으로 가정하였다. x, y 수평좌표의 방향에서, 유체에 대해 수심적분된 운동량방정식과 연속방정식(Falconer, 1986a & b) 및 BOD평형방정식은 다음과 같다(McDowell & O'Conor, 1977).

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial UH}{\partial t} + \beta \left(\frac{\partial U^2H}{\partial x} + \frac{\partial UVH}{\partial y} \right) \\
 & - fVH + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} \\
 & - \frac{\rho_a C^* \times W_x (W_x^2 + W_y^2)^{1/2}}{\rho} \\
 & + \frac{gn^2 U (U^2 + V^2)^{1/2}}{H^{1/3}} - \epsilon H \\
 & \left(2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad (1) \\
 & \frac{\partial VH}{\partial t} + \beta \left(\frac{\partial UVH}{\partial x} + \frac{\partial V^2H}{\partial y} \right) \\
 & + fUH + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} \\
 & - \frac{\rho_a C^* \times W_y (W_x^2 + W_y^2)^{1/2}}{\rho}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{gn^2 V (U^2 + V^2)^{1/2}}{H^{1/3}} - \epsilon H \\
 & \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial B}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(DA \frac{\partial B}{\partial x} \right) - U \frac{\partial B}{\partial x} \\
 & - (K_1 + K_3) B + B_a \quad (4)
 \end{aligned}$$

단, U, V 는 x, y 방향에서 수심평균 유속 성분, t 는 시간, β 는 연직유속분포의 비균질성에 대한 보정계수(=1.016), f 는 코리올리 계수(=2 $\omega \sin \phi$, 위도 $\phi=35.17^\circ$), η 는 해도수심에서의 수면변위, H 는 전수심, g 는 중력가속도, ρ_a (=1.25 $\times 10^{-3}g/cm^3$)는 공기 밀도, C^* (=2.6 $\times 10^{-3}$)는 해면에서의 저항계수, W_x 와 W_y 는 각각 x, y 방향의 바람 속도 성분, ρ 는 유체밀도(=1026), n 은 해저면 조도 계수(=0.03), ϵ 은 수심평균 와동점성계수이다(=10 m^2/s). B 는 초기단계 BOD값, A 는 평균단면적, D 는 수심평균된 종방향 분산계수(=13 m^2/s), K_1 은 생화학적 산화에 의한 BOD의 감소율(=0.21/day), K_3 는 해저 침전물상의 유기물질의 침전작용과 흡수로 인한 BOD의 감소율이며(=0.13/day), B_a 는 BOD의 증가율(=0)이다. 초기조건은 간조의 전해역에서 해수가 정지하고 있는 것으로 한다. 격자간격(Δx)은 150 m 로 하였기 때문에, Time step(Δt)은 계산안정조건($\Delta t \sqrt{gH_{MAX}} / \Delta x \leq 8$)을 고려해서 60초로 하였다. 계산에 사용된 만내 유입유량과 조위는 7월의 실측 자료를 이용하였고 (해양연구소, 1981),

BOD값은 Fig.1의 봉암천 입구에서 $3.72\text{mg}/\text{l}$ 로 가정하였다.

3. 結 果

3.1 현장관측

기상청년보(1989, 90, 91)에서 3년간 평균된 마산만의 월별 風向頻度和 최대풍속을 나타내면 Fig.2와 같다. 그림의 위부분은 년중 가장 빈도가 높은 풍향의 6方位에 대한 월별 빈도율을 나타낸 것으로서, 南風과 남남동풍이 6, 7월에 각각 20%이상되며, 그외의 달에는 대부분 6%미만이다. 반면에 北風과 북북서풍은 1, 2월에 각각 18~22%범위로 가장 빈번하게 나타났다. 즉, 이곳은 여름에는 남풍 또는 남남동풍, 겨울은 북풍 또는 북북서풍이 자주 부는 뚜렷한 계절풍현상을 보인다. Fig.2의 아래그림은 6~8월중 풍향별 최

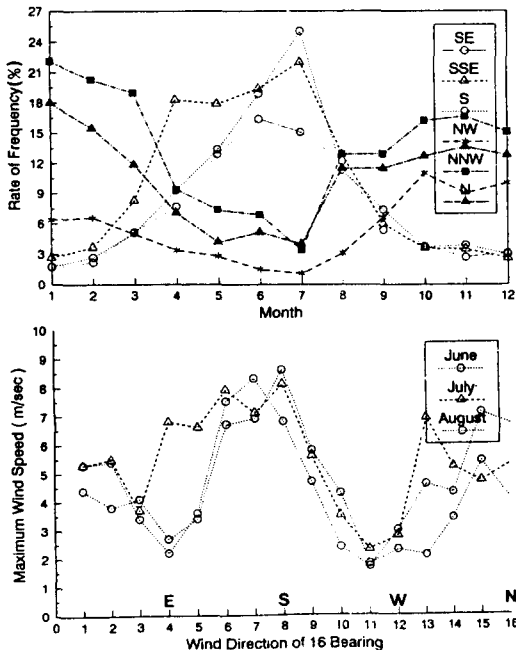


Fig. 2. Rate of frequency of 3 years-averaged S & N wind(top) and maximum speed(bottom).

대풍속을 나타낸 것으로, 남 또는 남남동풍이 $7\sim 9\text{m/s}$ 로 가장 크게 나타났다.

또, 하루중 바람세기의 변화를 알아 보기 위하여, 관측일 5일간 측정된 마산측후소(1992)의 바람자료를 시간에 따라 나타내면 Fig.3과 같다. 이 그림에서는 오전8시부터 남 또는 남동풍이 불기 시작하여 오후22시까지 지속적으로 불고 있으며, 그 세기도 7월 16일을 제외하고 $10\sim 12$ 시간동안 평균 5m/s 정도의 바람이 불었음을 볼 수 있다.

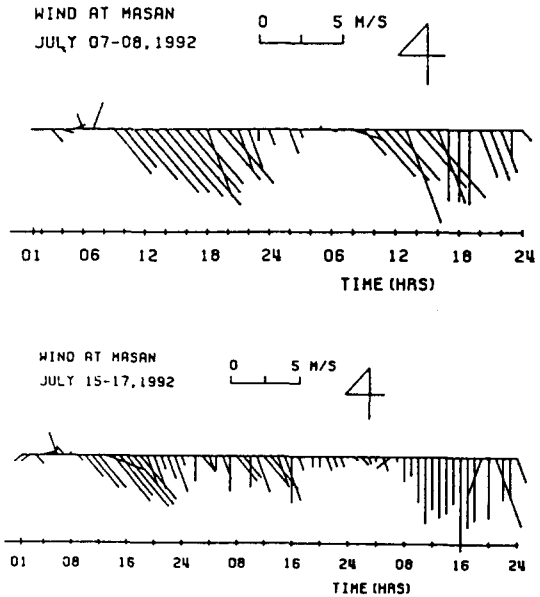


Fig. 3. Hourly variation of wind vectors for neap(top) and spring tide(bottom).

Fig.4는 各 斷面의 중앙부근에서 측정된 유속의 층별분포도이다. 왼쪽의 St.1B는 표층과 1m 층에서 전류시와 상관없이 11시경부터 16시까지 북 또는 북동방향으로 계속 흘러가고 있다. 이것은 9시부터 22시까지의 지속적인 남동풍때문으로 추정된다. 그러나, 저층인 3m 수심에서는 정반대의 흐름이 계속되고 있다. St.2B는, 바람이 16시에서 22시까지 불었으나 나머지 관측기간동안은 불지 않았던 야간에 측정된 유속벡터도이다. 이곳은 바람의 영향을 뚜렷이 볼 수 없다. 만구

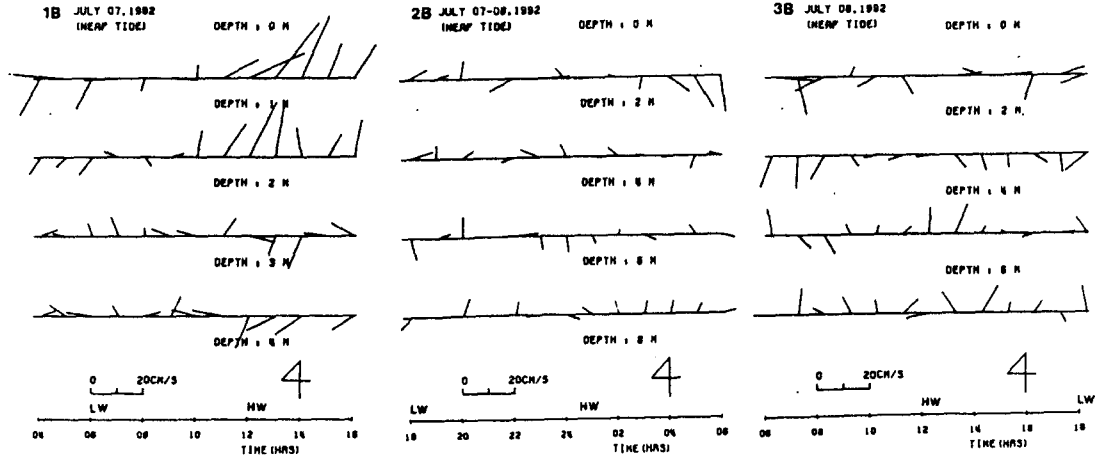


Fig. 4. Time series of observed current vectors and tidal levels(bottom) at Sts. 1B, 2B and 3B.

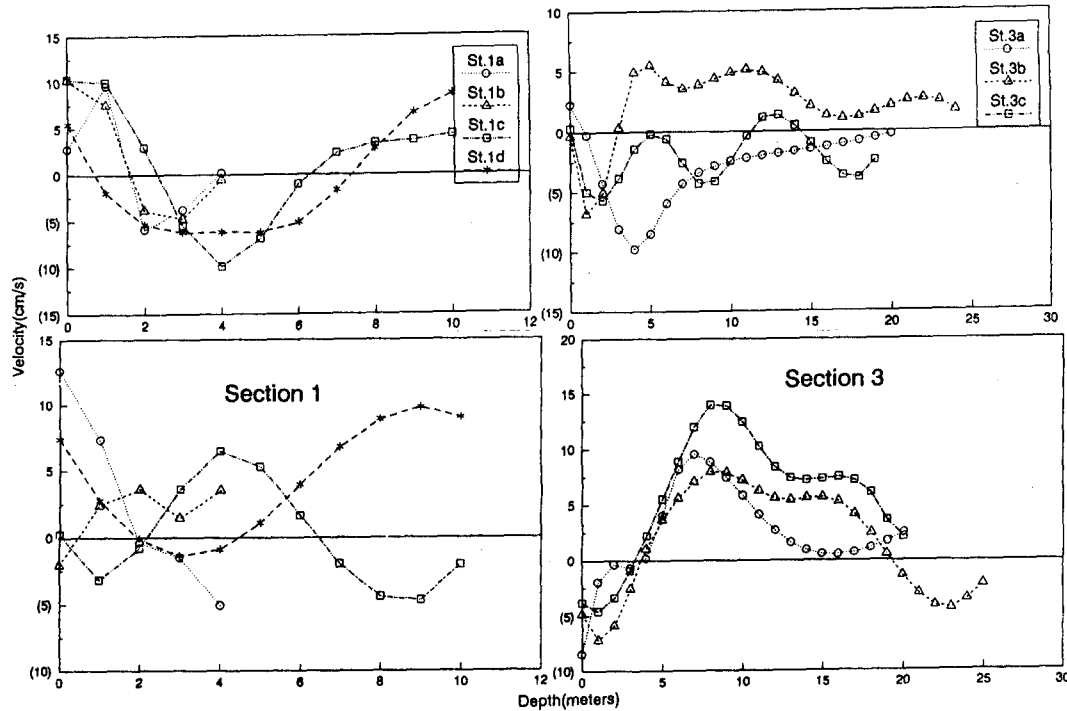


Fig. 5. Transverse changes in the half ebb(top) and half flood velocity profiles (bottom) at sections 1 and 3.

인 St. 3B는 낮동안 관측되었음에도 바람의 영향을 보기 어렵고, 0~2m층은 유출, 4~6m층은 계속 만내로 유입되고 있다.

Fig.5는 단면 1과 3에서 最强流時 유속의 연직변화도이다. 유속표시에서 ()의 숫자는 流出유속(바다쪽)을 뜻한다. 왼쪽그림인

단면 1의 유속은 썰물때(위)임에도 바람의 영향으로 2m 수심까지 연안쪽으로 流入되고 그 크기는 중앙정점(St.1B,1C)에서 10cm/s, 가장자리(St.1A,1D)에서 2~5cm/s이다. 밀물때(아래)는 가장자리에서 유입되고 중앙부근 정점은 약하게 유출된다. 또, 횡방향인 각

정점들간의 횡변화유속이 연직으로 크게 변하고 있다. 오른쪽의 단면 3은, 썰물때(위) 단면중앙인 St.3B에서 표층을 제외한 전수심에서 만대로 유입되나, 만구 가장자리에서는 약하게 유출되고 있다. 밀물때(아래)는 표층에서 유출되나, 중층이심에서 강하게 유입된다.

3.2 수치실험

본 모델의 계산은 대·소조기별 現場의 유량, 바람 및 조위자료를 입력하여, 조류가 충분히 정상상태에 달하였다고 생각되는 20 조석주기까지 행하였다.

모델의 검정을 위하여, 그 중에서 마지막 2조석주기(226~250시간)에 대한 유속과 현장유속 및 조위곡선을 비교하여 나타내면 Fig. 6과 같다. 그림에서 보면, 소조기(위)는 현장유속값과 대체로 잘 일치하나, 대조기는 풍향에 따라 수치실험의 유속값이 약간 크게 나타났다.

3.2.1 유속

첫단계로 바람이 없고 유량 $Q=10.8\text{m}^3/\text{s}$ 인 대조기의 최강류시 흐름양상을 나타내면 Fig. 7과 같다. 유속크기는 돌섬(저도)북쪽이 대부분 5cm미만이고, 돌섬에서 만구사이의

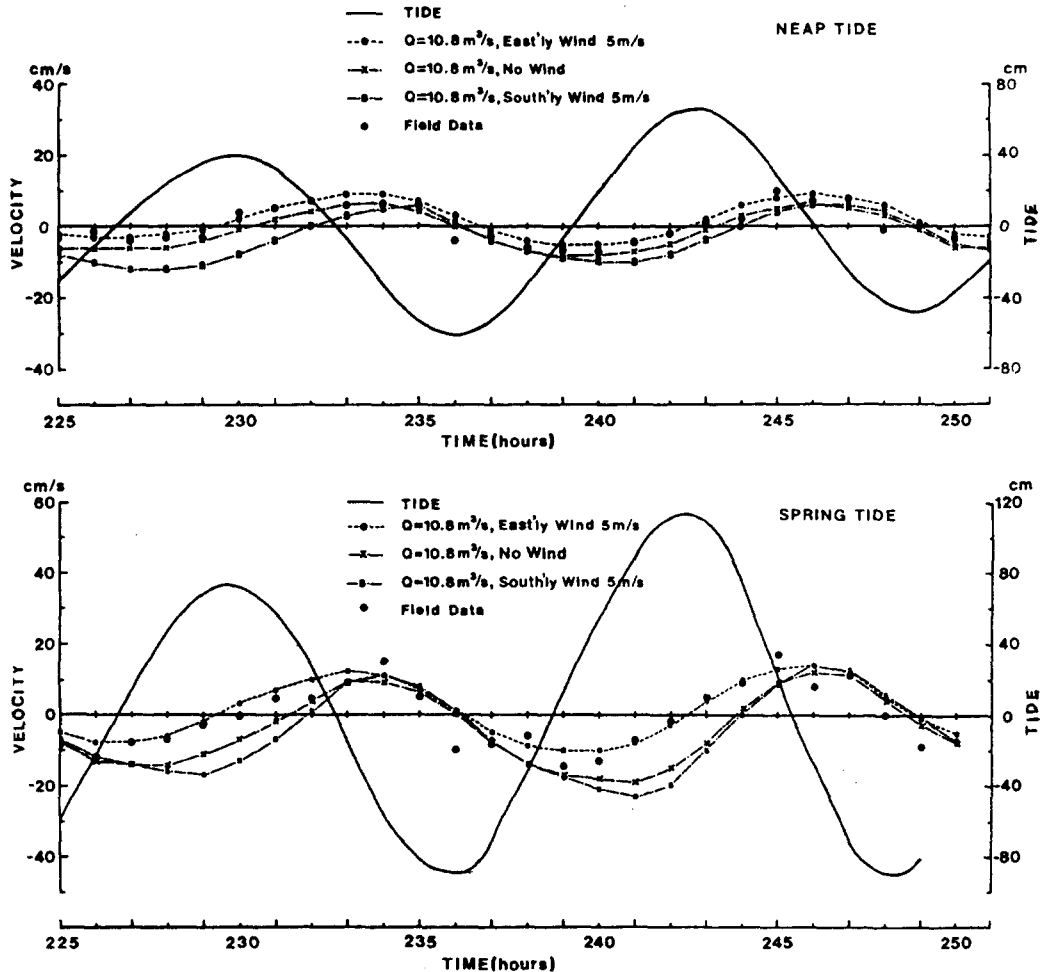


Fig. 6. Comparison of currents between the observation and calculation.

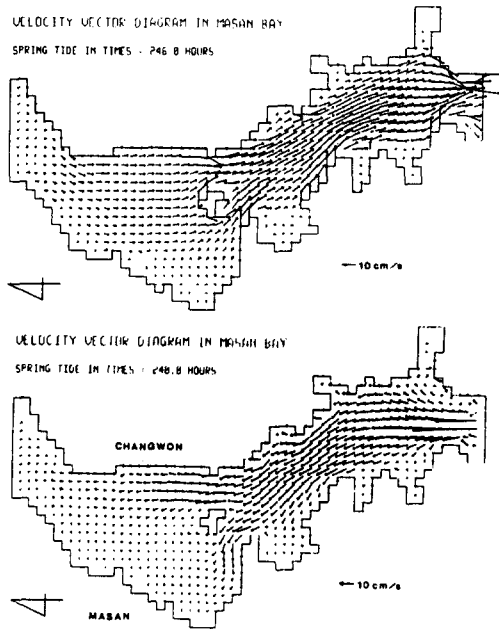


Fig. 7. Pattern of currents for the case induced by the fresh water ($Q=10.8$) without wind.

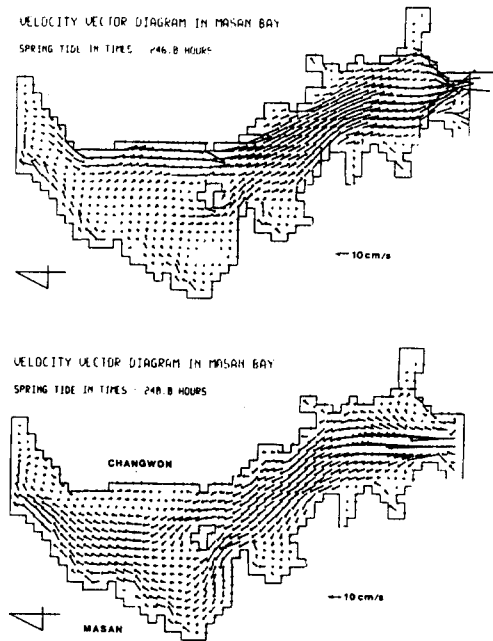


Fig. 8. Pattern of currents for the case induced by S wind, $5m/s$.

유속이 $10cm$ 전후로 구분할 수 있다. 흐름양상은, 최강류시 썰물때(위 : 246시간)는 돌섬西와 東수도를 통해 흘러나가나, 밀물때(아래 : 240시간)는 주로 돌섬 東西道를 통해 창원공단 연안으로 흘러 들어온다. 반면에 만의 동쪽인 마산연안은 유속이 $1\sim 2cm/s$ 로 아주 미약한 흐름을 보인다.

흐름에 미치는 바람영향을 조사하기 위하여, Fig. 2와 3의 결과에서 얻은 풍향과 풍속 조건을 고려하여 얻은 실험결과는 다음과 같다.

여름철을 대표하는 南風과 풍속 $5m/s$ 로 하여 최강류시 썰물과 밀물의 흐름양상을 나타낸 것이 Fig. 8이다. 썰물때(위)는, Fig. 7(위)과는 달리, 돌섬 북쪽해역에서 마산만 서쪽해안을 따라 흘러들어가며, 만안쪽끝에서 오른쪽으로 돌아 창원연안을 따라서 다소 강하게 흘러 나가고 있다. 돌섬과 마산연안 사이에는 약한 우선과류현상이 보인다. 이것은 지형적 영향으로 생각된다. 밀물때(아래)

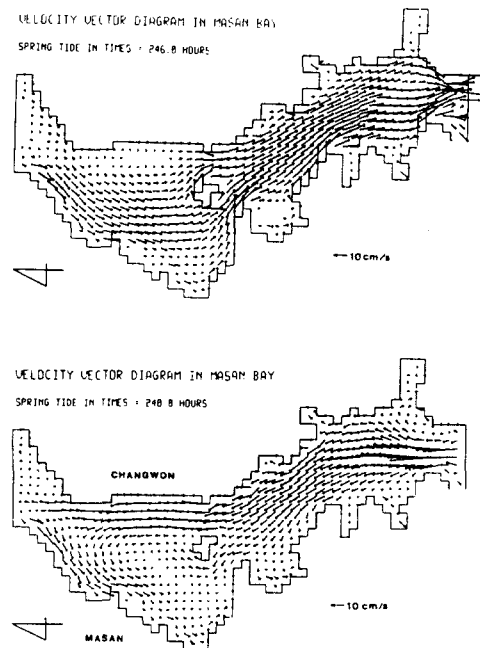


Fig. 9. Pattern of currents for the case induced by N wind, $5m/s$.

는, Fig. 7(아래)과는 반대로, 마산시 연안쪽으로 강한 흐름이 유입되어 들어움을 볼 수 있다.

겨울철을 대표하는 北風과 풍속 5m/s로 분 경우의 최강류시 썰물과 밀물 흐름양상을 나타내면 Fig. 9와 같다. 썰물때(위)는 마산만 서쪽해안(마산시)을 따라 다소 강하게 흘러 나간다. 밀물때(아래)는 마산만 동쪽(창원시)해안을 따라 주로 유입되어, 만의 北端에서 좌선와류하면서 만의 서쪽연안을 따라 흐르다가 미약한 흐름이 되어 거의 정체하고 있다.

이상의 두 경우에서 공통된 특징은 바람이 없는 경우와는 대조적으로, 돌섬을 중심으로 북쪽인 만 안쪽에서 바람의 영향을 많이 받아 유속이 크게 차이되며, 흐름양상 또한 서로 다름을 알 수 있다. 또 하나의 특징은, 만의 北端에 가까운 단면 1(오동동과 감서말 사이)의 오동동 해안은 밀·썰물에 관계없이 항상 남풍이 불 때는 만안쪽으로 유입되고, 북풍이 불 때는 마산연안을 따라 흘러 나간다.

3.2.2 조석 殘差流

오염물질 수송에 직접 기여하는 恒流성분은 하천유량과 日潮不等에 의한 조석잔차류의 합으로서 이루어지나, 吹送流와 傾斜流 등으로 그 크기와 흐름분포가 달라진다. 본 실험에서는 하천유량과 1조석주기동안의 조석잔차류를 항류로 하여 오염물질 수송에 미치는 바람의 영향을 조사하였다.

Fig. 10에서, 윗쪽그림은 하천유량은 있으나 바람이 없는 일반적인 경우의 조석잔차류 분포이고, 중간은 겨울 북풍, 아랫쪽은 여름 남풍이 각각 5m/s로 분 경우의 항류분포도이다. 바람이 없는 경우 만 전체는 아주 미약한 크기(1cm/s정도)의 항류가 존재하며, 만의 북쪽 중앙해역은 흐름이 없는 곳도 있다. 이 현상은 봉암천에서 흘러나온 하천유량과 조석잔차류가 합쳐서 생긴것으로 추정된다. 만입구 바로 위쪽인 소모도 북쪽해역

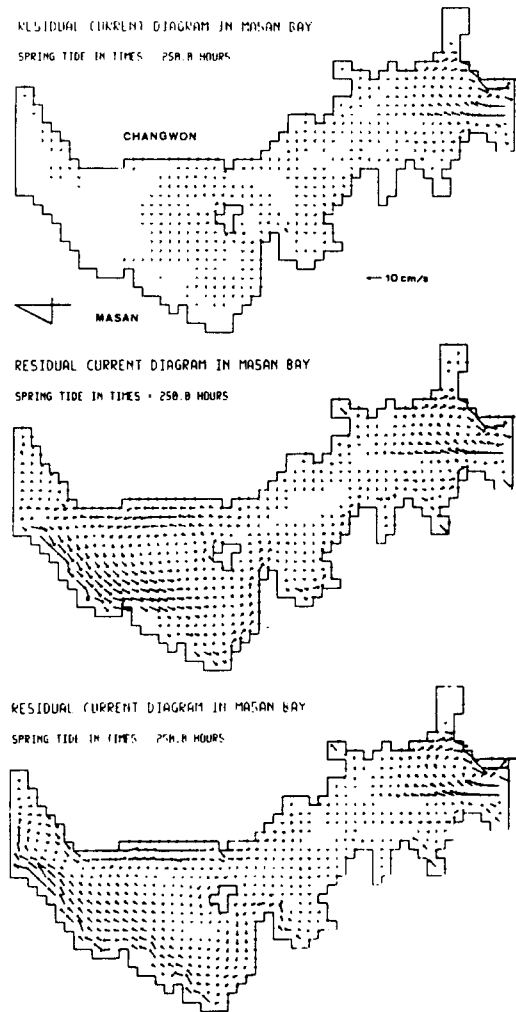


Fig. 10. Pattern of the tidal residual currents for the cases induced by no wind(top), N wind(mid) and S wind, 5m/s(bottom).

에서 소규모 우선와류현상이 보인다. 이해역은 만입구에서 수심이 깊고 그 위쪽 수심이 절반가량 얕지만, 수심변화의 효과보다도 주변해안선의 영향이 시계방향의 순환에 기여했다고 보아진다.

그러나, 북풍때(중양그림)의 항류는, 바람이 없는 경우와는 아주 다르게, 만의 북쪽 천해에서는 큰 와류를 형성하여 창원연안으로 흘러 들어와서 마산연안을 돌아서 해안선을 따라 흘러 나간다. 특히, 마산 오동동연안에서 9cm/s 정도의 유출류가 존재한다.

남풍때(아래)는, 북풍때와는 반대로, 들섬 서쪽수도에서 흐름이 형성되어 들어와 만의 서쪽연안을 따라 흐르며, 만 안쪽끝에서 오른쪽으로 돌아 동쪽인 창원연안으로 흘러 나간다. 이때도 큰 흐름이 있는 곳은 마산의 오동동연안이며 8cm/s 가량의 유속이 흐른다. 그러나, 바람이 불어도 남·북풍에 관계없이, 만의 남쪽(들섬과 만구사이)은 유속크기와 흐름양상이 거의 변하지 않음을 볼 수 있다.

이상의 결과에서 보면, 첫째로 바람영향에 관계없이 들섬에서 만입구까지는 항류의 흐름양상이 거의 같으며, 만입구는 항상 소규모 우선와류를 형성하고 있다. 둘째로, 바람이 있는 경우 항류가 거의 없는 만의 북쪽 천해에서 비교적 큰 와를 형성하면서 잘 혼합되며, 약 $8\sim 9\text{cm/s}$ 의 큰 항류가 존재한다. 그러나, 들섬의 양수도를 통하여 만구는

흘러나가는 현상을 보이지 않는다. 이것은, 5m/s 의 바람이 분 경우, 수심 10m 미만에서는 바람에 의한 유속변화가 크므로 연직 유량변화에 영향이 있을 것으로 생각되며, 이보다 수심이 깊은 해역은 그 영향이 적음을 의미할 것이다. 따라서, 마산만은 만구가 좁음에 더하여 들섬으로 인해 또한번 흐름을 차단하여 오염물질이 얇은 내만에 정체할 수밖에 없을 것으로 추정된다.

3.2.3 BOD 분포

연안어장의 생물활동을 통한 BOD(Biochemical Oxygen Demand)의 제거는 용존산소 유지의 가장 중요한 인자(Sink)이다. BOD의 만내분포에 대한 하천유량과 바람영향을 파악하기 위하여, BOD값을 입력하여 한주기조석동안 얻은 결과를 나타내면 Fig. 11과 12이다.

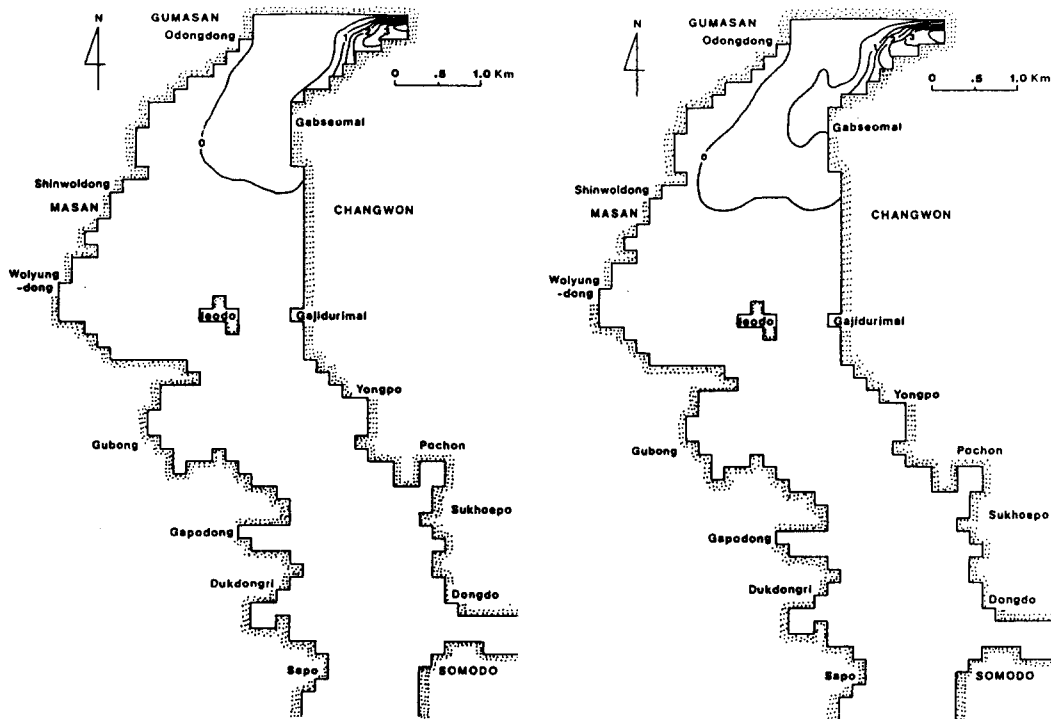


Fig. 11. Distribution of pollutant concentration (BOD) for the cases with the fresh water, $Q = 10.8$ (left) and $Q = 15$ (right) without wind.

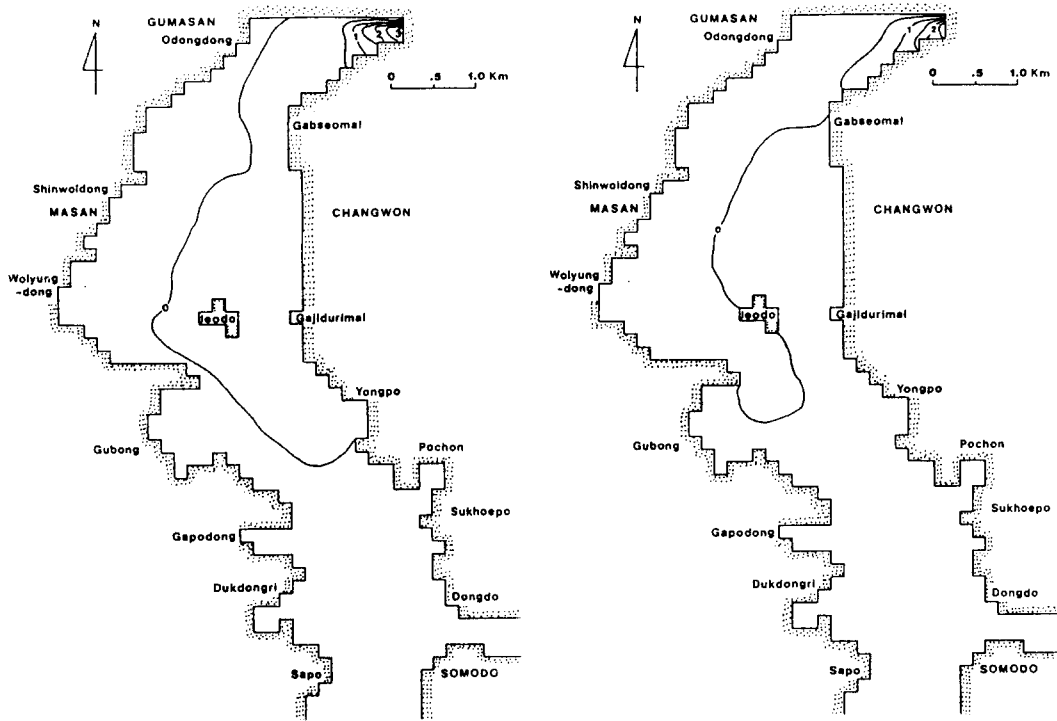


Fig. 12. Distribution of pollutant concentration (BOD) induced by S(left) and N(right) wind, 5m/s.

Fig. 11은, 왼쪽이 하천유입량 $Q=10.8m^3/s$, 오른쪽그림이 $Q=15m^3/s$ 인 경우로서, 최강류시 썰물때의 BOD 분포를 나타낸 것이다. 유량이 1.5배 증가하여도 큰 변화는 없었다. 이것은 홍수기가 아닌 평상시의 하천유량이 다소 변동하여도 오염물질의 분산범위는 그 변동이 아주 적음을 의미할 것이다. Kang et al(1989)이 COD분포에 대해 $Q=0$ 과 $10m^3/s$ 인 경우의 수치실험결과와도 잘 일치하고 있다.

Fig. 12는, 남풍(왼쪽)과 북풍(오른쪽)이 분 경우의 BOD분포이다. 남풍때는 봉암천 입구에서 시작하여 창원연안인 만의 동쪽해안을 따라 돌섬의 남동쪽 해안인 용포까지 흘러 나오고 있다. 반면에, 북풍때는 만의 서쪽해안을 따라서 돌섬의 남서쪽 해안까지 흘러간다. 이런현상은, Fig. 10에서와 같이, 흐름에 따라 분산되고 있음을 알 수 있다. 그러나, Fig. 11과 비교하면, 그 분포해역이

2배정도로 훨씬 멀리 퍼져 있음을 볼 수 있다.

따라서, 남풍이 불 때(여름철)는 오염물질이 만의 동쪽을 따라 흘러 나오므로서 마산 연안보다 창원연안에 오염정도가 다소 심하나, 북풍이 불 때는 그 반대임을 알 수 있다.

4. 향류의 形成과 輸送에 미치는 바람의 효과

계절적으로 뚜렷한 바람이 지속적으로 부는 마산만은 바람의 영향을 받아서 만의 북쪽인 천해역에서 국소와류는 물론 수십평균투류와 향류의 수평적 흐름양상을 크게 바뀌어 놓았다. 이와같은 예는, 동경만에 대한 Ikeda et al(1981)의 보고에서도 잘 나타나 있다. 또, 표층의 취송류는 해면기울기를 일으켜 중·저층에서 경사류를 발생시키며, 혼합, 교환 또는 분산함으로써 해수의 용존물

질을 수송하게 된다. 따라서, 단면의 흐름유속을 분해하여 바람에 의한 순 해수수송량을 추정할 수 있을 것이다.

한 정점에서 관측된 순간유속은 연직 2차원적으로

$$U(x, z, t) = u_0(x) + U_1(x, t) + U_s(x, z) + U'(x, z, t) \quad (5)$$

와 같이 나눌 수 있다(Fischer, 1972). 여기서, u_0 는 한조석주기평균을 뜻하며, 단면평균(\bar{u})와 일시적 편차 U_1 의 차로 표시된다. U_s 는 단면편차 u_2 의 조석주기평균을 뜻하며, u_2 의 일시적 편차를 U' 로 하였다. 위식에서 $u_0 + U_s$ 의 양은 중력순환류(Gravitational circulation)로서 하구역에서 나타나는 흐름이다. 즉, 단면의 上流는 바닷쪽, 下流는 연안으로 흐르는 순 定常순환류를 의미한다.

수평2차원 수치실험에서는 수심(단면)평균류(\bar{u})와 항류(u_0)를 잘 나타낼 수 있으나, 취송류와 경사류를 나타내기에는 부족하다. 그러므로, 현장 관측유속에서 소조기의 각 단면 정점들의 수심별 중력순환류를 계산하여 나타내면 Fig. 13과 같다. 그림에서, 단면1은 수심 0~1m인 표층에서 4.1~6.4cm/s로 유입되고 있고, 2~6m층까지 유출되다가 다시 6m이심에서는 만으로 유입되고 있다. 표층의 만내유입은 바람에 의해서 형성된 취송류로서 풍속의 0.8~1.3%범위이다. 이값은 오사까만의 장기관측에서 얻은 0.5~1.5%범위와 거의 같은 결과이다(Yanagi, 1980). 중층에서의 유출현상은 수위차로 인한 경사류로 추정된다.

단면2에서는 St. 2D 표층에서 약간 유입되지만 단면의 가장자리인 St. 2A와 2D는 상층에서 유출, 하층에서 유입되는 정상적 순환류를 형성하고 있다. 그러나, 단면중앙의 St. 2B와 2C는 연직으로 진동하는 흐름구조를 갖고 있다. 따라서, 단면2는 상하층의 흐름변동이 적고 뚜렷한 바람영향을 볼 수 없다. 이것은 관측시간이 오후16시에서 다음날 04시30분까지 측정하였으므로, 지속적인 바

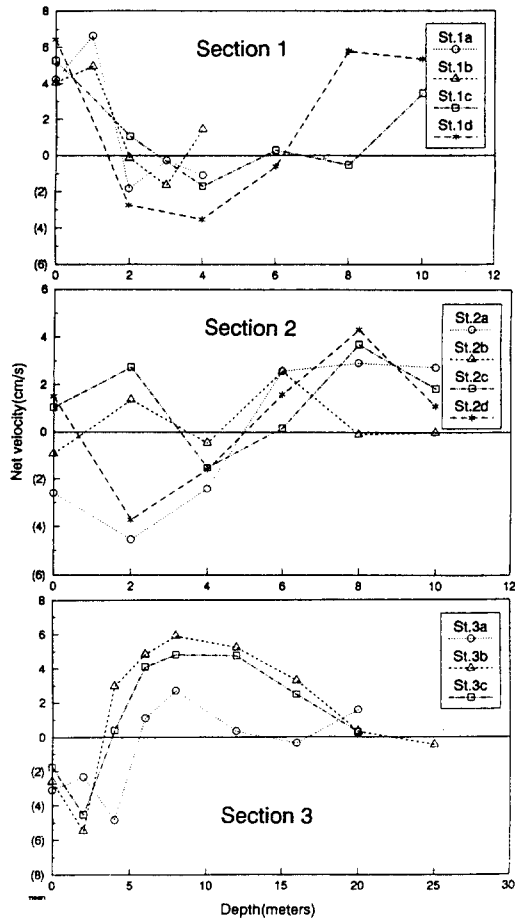


Fig. 13. Transverse changes in the profiles for the vertical gravitational circulation at sections 1 to 3.

람이 없었기 때문으로 생각된다.

단면3은 표층인 3m수심까지 만으로 유출되나, 중층의 수심에서는 St. 3B와 3A에서 강하게 유입되고 있다. 이것은 만구가 좁아서 바람의 영향이 적고, 진해만에 연결되어 바람보다 조석잔차류의 영향을 크게 받은 것으로 추정된다. 이러한 현상은 앞의 수치실험결과(Fig. 10)에서도 볼 수 있었다.

한편, Fig. 10의 바람이 없는 경우에 대한 항류분포에서 알 수 있듯이, 관측단면 1의 해역에서 하천유량과 조석잔차류에 의한 항류가 아주 적으므로 흐름이 없다고 가정하면, 취송류로 인한 유입유량과 경사류로 인

한 유출량의 차로써 단면1에서의 순 해수 수송량은 계산가능하다. 단면1의 $u_0=1.51\text{cm/s}$ 이므로 약 $100.1\text{m}^3/\text{s}$ 로 유입되고, 단면2는 약 $151.5\text{m}^3/\text{s}$ 유입된다. 여기서 분명한 것은 바람에 의한 輸送은 만의 북쪽해역에 수위상승을 가져오므로, 실제로 수시간 또는 1조석보다 긴 시간크기의 흐름을 갖는 순환류를 기대할 수 있을 것이다. Weisberg et al(1976)은 부분적 成層을 이룬 Narragansett만(수심 12.8m)에서 한 방향으로 $5\sim 10\text{m/s}$ 의 바람응력을 받은 경우, 해면기울기가 생겨서 수위차가 수cm 상승하고 해수수송변동량이 $500\text{m}^3/\text{s}$ 임을 밝혔다.

따라서, 이 순환류는 Fig. 13의 단면1에서 처럼, St. 1A, 1B보다는 St. 1D의 중층을 통하여 강하게 유출됨을 볼 수 있다. 또, 이런 현상은, 수치실험결과인 Fig. 10(아랫그림: 남풍)의 단면1(동쪽연안: 감서말)에서 수평순환류가 유출되고 있는 것을 보아도 알 수 있을 것이다.

5. 結 論

마산만의 여름철 현장관측과 수평 2차원 수치실험에서 다음과 같은 몇가지 결론을 얻었다.

1. 마산만의 북쪽해역은 5m/s 의 바람이 불 때, 바람의 영향을 크게 받으며, 이로 인해 局所渦流와 循環流를 발생시킨다. 그러나, 남쪽해역(돌섬에서 만구까지)은 바람의 영향이 적다.

2. 恒流는 바람이 없는 경우, 북쪽해역에서는 없거나 1cm/s 정도로 아주 미약하게 존재하고, 남쪽해역의 만구에서는 바람유무에 관계없이 거의 일정하게 유출입하고 있으므로 조석찬차류일 가능성이 높다.

3. 여름철 남풍이 불 때, 북쪽해역은 만의 서쪽해역(마산시)을 따라 항류가 크게 발달하며, 북서해안을 右旋회하여 만의 동쪽(창원시)해안을 따라 나오면서 돌섬부근에서 소

멸된다. 겨울철 북풍때는 이와반대로 左旋회한다.

4. 바람으로 발생된 취송류는 약 2m 수심까지 직접 영향을 미치며, 이로 인하여 수평순환류의 연직변화를 가져오게 될 것이다. 따라서, 바람은 海水輸送을 지배하나, 갈수기의 하천유량은 그렇지 못하다.

5. 소모도 북쪽해안은 항상 右旋회류를 형성하고 있다. 이것은 해저水深變化보다 海岸線의 영향때문으로 생각된다.

6. 봉암천에서 汚染物質이 흘러나올 경우, 여름철에는 만의 동쪽해안을 따라서 유출되고, 겨울철에는 반대로 만의 서쪽을 따라서 흘러나온다. 이들은 혼합, 교환 또는 分散과정을 거치면서 바람이 있는 경우, 그 수송거리는 크게 길어진다.

본 모델은 수평순환류에 대한 바람의 영향을 잘 표현하고 있으나 보다 많은 현장 자료와 바람에 의한 유속, 염분 및 조석의 위상관계, 이로 인한 물질수송량의 변화와 중분산계수의 결정이 필요하다. 금후, 이들의 분석을 통해 분산특성을 재조명하고자 한다.

감사의 글

본 논문의 일부는 영국 Bradford University 수공학 연구실에서 수행되었으며, DIVAST 프로그램을 제공해준 R.A.Falconer 교수에게 감사드립니다. 또, 비바람치는 악조건하에서 열심히 해양관측을 도와준 부산 403 실습선 직원들에게 감사드립니다.

참고문헌

- 국립수산진흥원(1978) : 연어어장 및 임해공단 주변해역의 해수유동. 147-148.
 기상청(1989, 1990, 1991) : 기상년보.
 김종화 · 장선덕 · 김삼곤(1986a) : 마산만의 해수유동에 관하여. 한수지 19(3), 274-280.

- 김종화·장선덕·김해룡(1986b) : 마산만의 해수교환율, 한어지 22(3), 29-35.
- 남기수(1982) : 마산만의 담수교체시간, 해양연구소보 4, 1-10.
- 마산측후소(1992) : 1992년 7월의 기상관측자료.
- 해양연구소(1981) : 진해만의 적조 및 오염모니터링 시스템개발에 관한 연구, 3-124.
- 환경처(1991) : 진해만 일원 오염실태 조사보고서, 198-210.
- Falconer, R.A.(1986a): A Water - quality Simulation Study of a Natural Harbour. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 112(1).
- Falconer, R.A.(1986b): A Two-dimensional Mathematical Model Study of the Nitrate Levels in an Inland Natural Basin. International Conference on Water Quality Modelling in the Inland Natural Environment, Bournemouth, England.
- Fischer, H.B.(1972): Mass Transport Mechanisms in Partially Stratified Estuaries. Journal of Fluid Mechanics 53, 617-687.
- Ikeda, K.,M. Matsuyama and M.Tsuji(1981) : Effect of the Wind on the Current in Tokyo Bay. Umi to Sora, 57(1), 31-39.
- Kang, S.W., T.S.Jung, J.C.Lee and C.S. Kim(1989): Circulation and Dispersion of Pollutant in Masan-Jinhae Bay. Inst. Environ. RES., Kyungnam Univ. 11, 47-72.
- McDowell, D.M. and B.A.O'Conner (1977): Hydraulic Behaviour. The Macmillan Press LTD, 179.
- Nakamura, S.(1991): Applied Numerical Methods with Software. Prentice-Hall, pp. 540-548.
- Weisberg, R.H. and W.Sturges(1976) : Velocity Observations in the West Passage of Narragansett Bay : A partially mixed estuary. Journal of Physical Oceanography 6, 345-354.
- Yanagi, T.(1980) : Variability of the Constant Flow in Osaka Bay. Jour. of Oceanogr. Soc. Japan 36, 246-252.