

이 논문은 1983년도 문교부 학술연구 조성비에 의하여 연구 조성되었음.

낙동강 하수의 혼합 및 순환과정에 관한 연구

유 홍 선 · 민 병 언 · 신 중 상

A study on the mixing and circulating process at the mouth of Nakdong river

Yu, Hong-Sun · Min, Byeong-Eon · Shin, Jong-Sang

<목 차>	
1. 서 론	3. 혼합 과정의 특성
2. estuary의 일반 특성	가. 연직 혼합
가. 염분 특성	나. 수평 혼합
나. 유속 특성	4. estuary의 분류
다. 유 량	5. 결 론
라. 조석 프리즘 체적	6. 참고문헌

Abstract

In this paper, physical characteristics of the Nakdong estuary are studied. And following characteristics are found.

All the water mass in the estuary oscillates in phase with tide. Salinity profiles and velocity profiles show two-layer systems. The tidal waves show a mixed feature of standing waves and progressive waves. In this estuary, mixing process seems to be carried out dominantly by diffusion and advection.

In general, the estuary can be classified as a partially mixed estuary.

1. 서 론

우리 나라 여러 하천수의 estuary 특성에 관한 연구는 학문적인 관점에서 뿐 아니라 실용적인 관점에서도 대단히 필요한 것이다.

낙동강은 우리 나라(남한) 제일의 하천으로 estuary 연구에 가장 적절한 대상이라 할 수 있다. 특히 하구연 건설이 이루어져 곧 자연의 estuary 특성을 잃게 될 형편에 있기 때문에 그 이전에 자연 그대로의 estuary 특성을 밝혀두는 것이 역사적인 기록으로 중요함은 물론 하구연 건설 전후의

2 해사 기초과학연구소 논문집

변화를 비교 연구하는 일도 학문적으로 중요하고 생태환경 변화의 영향 연구 등 여러가지 실용적 인면에 있어서도 대단히 중요한 일이다.

그래서 본 연구자들은 몇 년간 계속 관측 실시하여 연구를 수행하고자 하는 계획하에 제1차년도 관측으로 1983년 8월 2일~4일, 9월 8일~10일 및 11월 3일~6일 등 3회에 걸친 관측결과 중 마지막 회 관측결과를 주로 하여 낙동강 하수의 혼합 및 순환과정의 특성의 1차적인 분석을 시도하여 본 논문을 작성하였다.

관측 지점은 그림 1의 지도에 표시된 B점, C점 및 D점이며 한 지점에서 1조석주기(13시간) 동안 매 시간마다 각 수심별(1m 간격으로) 수온, 염분, 유속 및 유향을 관측하였다. 유속측정에는 CM-2(TOHO DENTAN), 염분 및 수온측정에는 U-7(HORIBA)을 사용하였다.

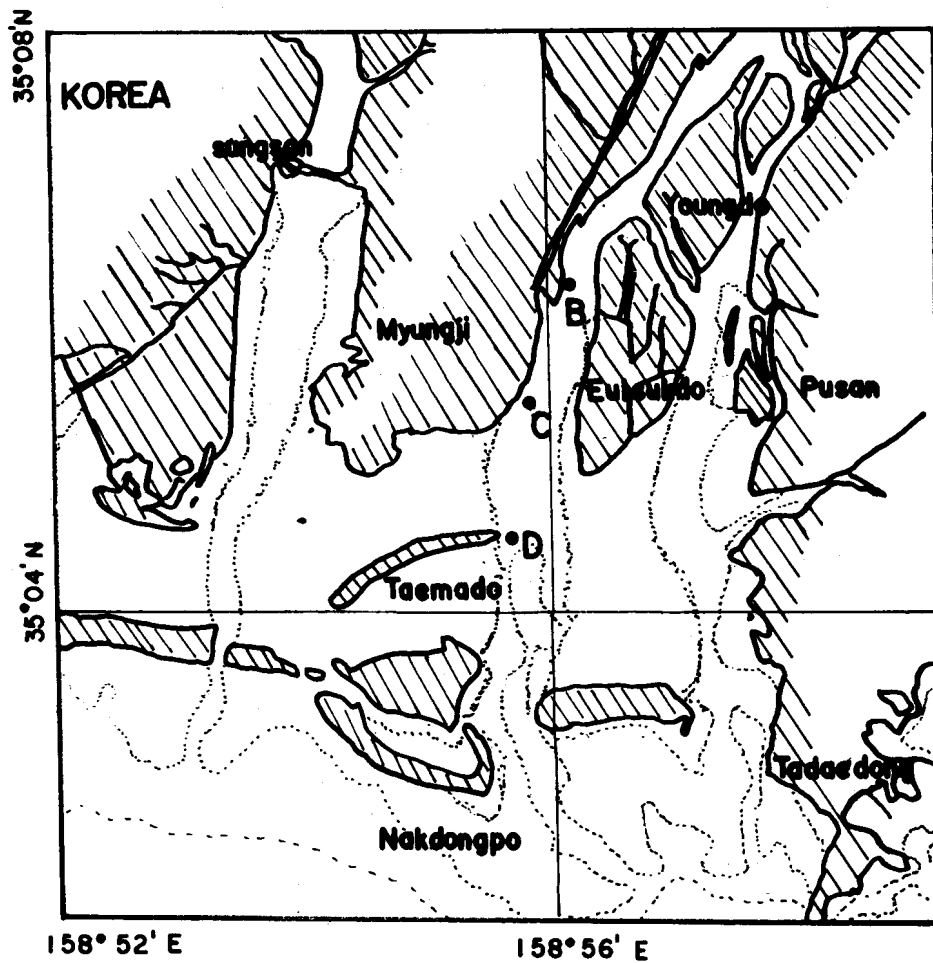


그림 1. 연구 수역

2. estuary의 일반 특성

가. 염분 특성

염분의 수직평균(\bar{S})에 대한 바닥 염분과 표면염분의 차(ΔS)의 비로 정의되는 성층변수(stratification parameter) $\frac{\Delta S}{\bar{S}}$ 는 B, C 및 D점에서 각각 0.38, 0.58 및 0.11이다.

보통 성층 변수의 값이 0.1 보다 클 때에 염분 연직분포가 성층을 이루고 있다고 말하는데, 이 기준에 따라 낙동강 하류의 물은 성층을 이루고 있음을 알 수 있다(그림 2, 3, 4). 특히 C점과 D점에서의 염분의 연직 분포도 그림 2, 3에서 보면 염분 기울기가 완만한 상하층과 그 중간의 기울기가 급해지는 혼합층으로 이루어진 성층구조를 확인할 수 있다.

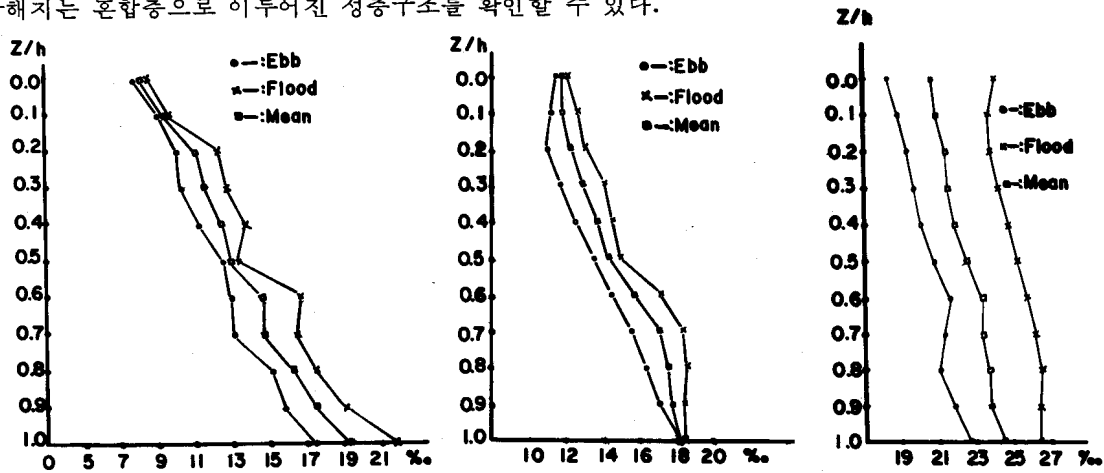


그림 2. B점에서의 염분 연직 분포 그림 3. C점에서의 염분연직 분포 그림 4. D점에서의 염분연직 분포

한편 염분의 강축을 따른 수평분포를 살펴 보면 B점과 C점 사이에서는 수평 염분분포의 기울기가 0.7, C점에서 D점 사이에서는 3.8로서 하류로 가면서 기울기가 크게 증가함을 나타낸다.

대체로 estuary는 상류에서 하류로 가면서 담수구역, 염분수평분포의 기울기가 완만하게 나타나는 구역, 조석의 영향이 강하게 나타나는 구역 및 해수구역 등 네구역으로 분류되는데, 경우에 따라서는 제2, 제3구역이 혼합되어 나타나는 수도 있으며, 낙동강 하류의 경우는 이 경우에 해당되는 것으로 판단된다.

염분의 시간에 따른 변화를 살펴보면(그림 5, 7, 9) B점과 C점에서 염분은 조석보다 대략 1~2시간정도 위상이 뒤져서 변화하고, 즉 염분 극대 및 극소가 고조 및 저조보다 1~2시간 늦게 나타나고, D점에서는 위상차가 보다 작은 것을 알 수 있다.



그림 5. B점에서의 염분시간 변화(H: high tide, L: low tide, F: flood, E: ebb)

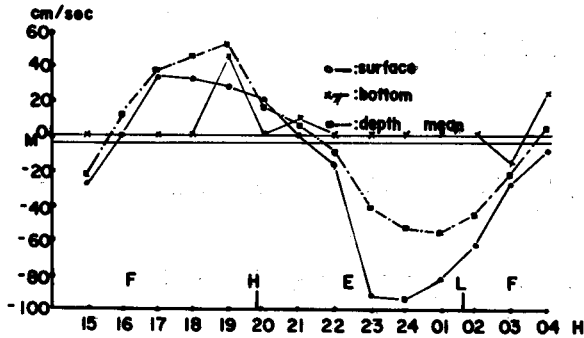


그림 6. B점에서의 유속시간 변화

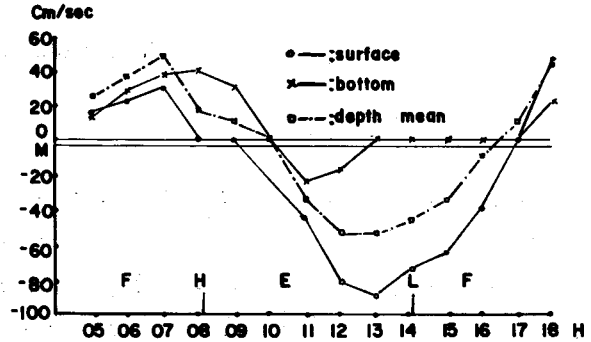


그림 8. C점에서의 유속시간 변화

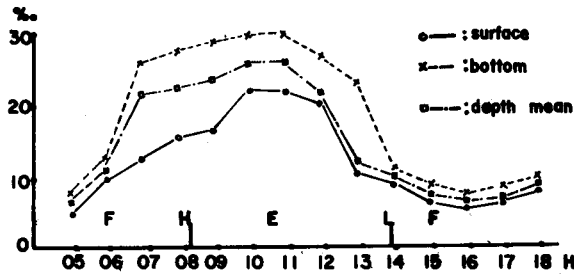


그림 7. C점에서의 염분시간 변화

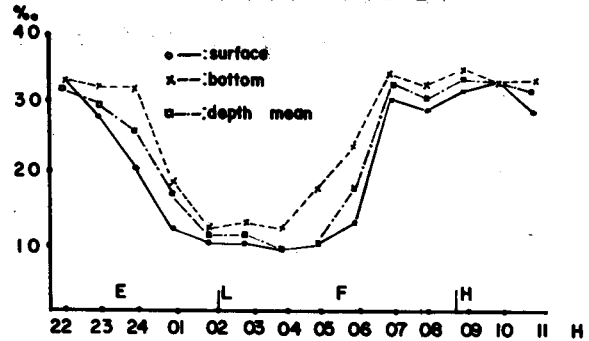


그림 9. D점에서의 염분시간 변화

나. 유속의 특성

그림 6, 8 및 10 등을 살펴 보면 낙동강 하류의 물은 조석에 따라 전 수심에 걸쳐 거의 같은 위상으로 왕복 운동함을 알 수 있다. 그리고 조석과의 위상차이는 B점 및 C점에서는 유속이 조석보다 약 1시간, D점에서는 2~3시간 앞섬을 알 수 있다. 이것은 B점 및 C점(강 하구 안쪽)은 조석파가 진행파의 성격을 강하게 나타내고, D점에서는 정상파와 진행파의 혼합형의 성격을 나타내고 있음을 뜻한다.¹⁾

이와 같은 현상의 해석은 몇 번의 관측이 더 이루어진 후에 시도되어야 할 일로 생각되며, 계속되는 후속 관측과 연구에 미루기로 한다.

조석 주기 동안의 평균 유속의 연직 분포(그림 11, 12, 13)는 B점과 C점에서 상층에서는 하류쪽으로, 하층에서는 상류쪽으로의 흐름을 보여 2층류(two-layer flow)의 특성을 보여준다.

흐름의 특성을 나타내는 또 하나의 척도로서 Reynolds 수(Re)와 Froude 수(F) 등을 구한 것이 표 1에 실려 있다. 이것을 그림 14의 흐름 특성도에서 보면 낙동강 하구에서의 흐름은 subcritically turbulent임을 알 수 있다.

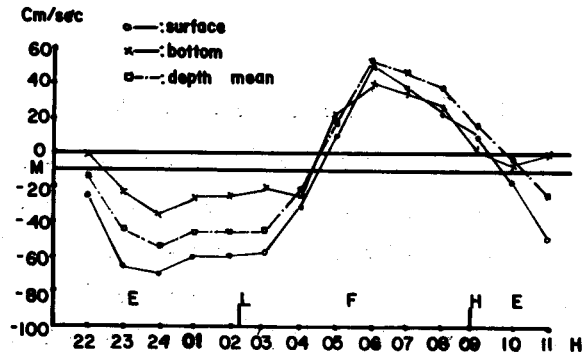


그림 10. D점에서의 유속시간 변화

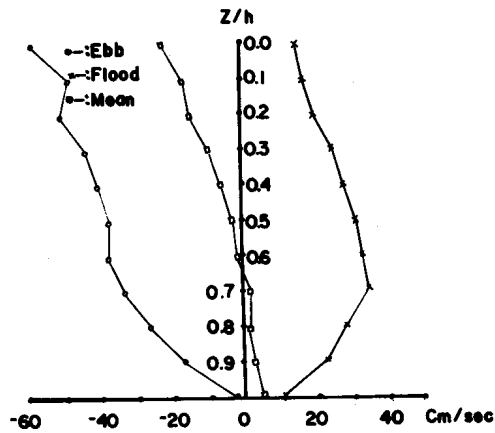


그림 11. B점에서의 유속연직 분포

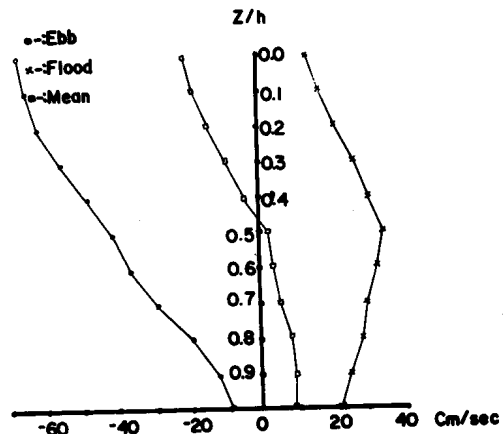


그림 12. C점에서의 연직분포

표 1. B, C 및 D점에서의 Reynolds수 및 Froude 수

B	Average over Flood	Average over Ebb
Re	2.09×10^6	3.69×10^6
F	0.244	0.359
C	Average over Flood	Average over Ebb
Re	1.26×10^6	1.76×10^6
F	0.326	0.509
D	Average over Flood	Average over Ebb
Re	1.19×10^6	1.58×10^6
F	0.400	0.529

다. 유 량

유량은 다음 식에 의해 구해진다.²⁾

$$R = \frac{1}{T} \int_0^T A u dt$$

여기서 $A = \bar{A} + A_0 \cos(\omega t + \theta)$ 로 나타내지는 조석에 따라 변하는 하수단면적, u 는 유속으로 $u = \bar{u} + U_0 \sin \omega t$ 로 표현되며, T 는 조석주기이다.

그러므로 평균유량은 다음과 같이 표현된다.

$$R = \bar{A} \bar{u} - \frac{1}{4\pi} A_0 U_0 T \sin \theta \quad (1)$$

식(1)에서 조석파가 진행파 ($\theta = \frac{\pi}{2}$)일 경우

$$R = \bar{A} \bar{u} - \frac{1}{2} A_0 U_0 \quad (2)$$

정상파일 경우 ($\theta = 0$)에는

$$R = \bar{A} \bar{u} \quad (3)$$

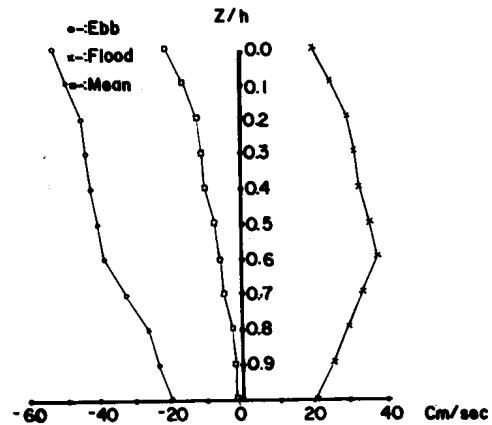


그림 13. D점에서의 연직분포

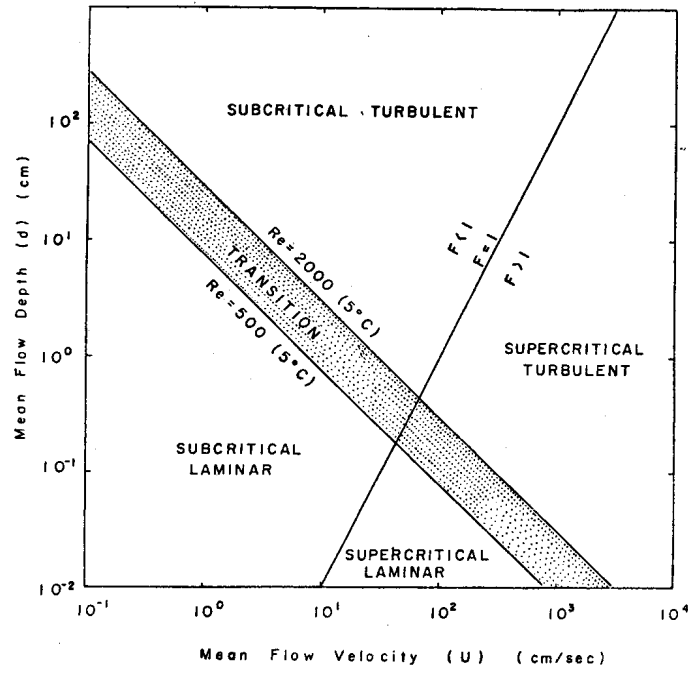


그림 14. 개방수로에서의 흐름 특성도

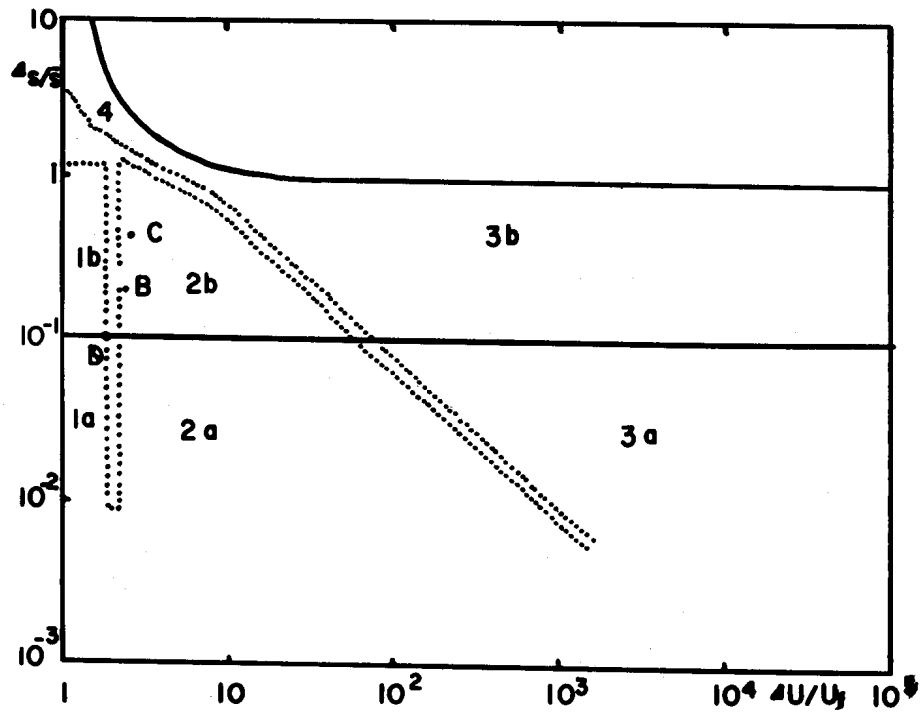


그림 15. estuary 분류도

이 된다. 식(1)로부터 B점, C점 및 D점에서 한 주기(12시간 50분) 동안의 유량(R)을 구하면 $6.9 \times 10^6 \text{m}^3$, $3.7 \times 10^6 \text{m}^3$ 및 $9.2 \times 10^6 \text{m}^3$ 의 값이 구해진다.

라. 조석 프리즘 체적

조석 프리즘 체적(tidal prism volume) P 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 P &= \int_0^{\frac{\lambda}{2}} A \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \cdot dx \\
 &= -\frac{A\lambda}{2} \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \Big|_0^{\frac{\lambda}{2}} \\
 &= \frac{A\lambda}{\pi} \qquad (4)
 \end{aligned}$$

식(4)로부터 B점, C점 및 D점에서의 P 는 $6.4 \times 10^7 \text{m}^3$, $3.3 \times 10^7 \text{m}^3$, $8.2 \times 10^7 \text{m}^3$ 의 값이 구해진다.

3. 혼합 과정의 특성

담수와 염수의 혼합은 수평 방향의 혼합과 연직 방향의 혼합으로 나누어서 생각할 수 있는데, 수평 방향의 혼합은 조류의 진동에 따른 이류에 의한 혼합과 수평 확산에 의한 혼합으로 이루어지고 연직혼합은 entrainment와 연직 확산에 의하여 이루어진다.³⁾

낙동강 estuary에서의 각 혼합과정들의 역할을 살펴보면 다음과 같다.

가. 연직 혼합

성층류(stratified flow)에 있어서의 염수와 담수의 혼합과정은 entrainment와 확산(diffusion)과정에 의해서 이루어지는데 entrainment란 난류의 정도가 보다 덜한 층의 수피가 보다 더한 층으로 유입되는 일방 과정으로 설명되어지며, 두층간의 속력차가 클수록 entrainment 과정은 활발히 이루어진다. 그리고 하층으로부터 상층으로 유입되는 물의 양으로 말미암아 하구로 내려 갈수록 상층의 유량이 증가되어 estuary내의 흐름은 2층류를 형성한다.

반면, 확산과정은 두층의 경계면을 통하여 꼭 같은 양의 물이 교환되는 과정이다.

만약 상층과 하층에서의 난류 정도가 같으면, 혼합과정은 전적으로 확산에 기인되며, 하층이 안정되어 있으면 혼합과정은 entrainment에 의해서만 이루어진다.

일반적으로는 entrainment와 확산에 의한 혼합과정이 동시에 나타난다. 이들의 기여도는 근사적으로 조석 프리즘 체적에 대한 하천의 유량의 비에 비례한다.⁴⁾

낙동강 하구에서의 이 비는 앞서 구한 값에서 B점 및 C점에서 0.1임을 알 수 있는데, 이는 여기서의 혼합과정에 있어서 entrainment의 역할보다는 diffusion의 역할이 큼을 나타내고 있다.

양자의 역할을 비교하는 또 하나의 척도로 수심 각층의 난류도(turbulence)를 계산한 것이 표2에 실려 있다.

연직 확산계수 K_z 는 수평확산을 무시하고 근사적으로 구하면

$$K_z = \frac{\int \bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} \cdot dz}{\frac{\partial \bar{s}}{\partial z}} \quad (5)$$

로 구해질 수 있는데 B점과 C점 사이에서는 그 값이 $2.8 \text{ cm}^2/\text{sec}$, C점과 D점 사이에서는 $60.8 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 계산된다.

나. 수평 혼합

수평혼합은 앞에서 말한대로 이류와 확산의 두 과정에 의해서 이루어지는 바 낙동강 estuary에서는 물의 전용량이 조류 진동하는 특성이 보여 주는대로 이류에 의한 혼합이 상당한 역할을 하는 것으로 생각된다.

앞에서 언급한 바 있는 조류 진동이 큰 하류 쪽에서 더 큰 염분 수평 기울기를 가진다는 사실은 이를 확인해 주는 증거가 된다.

한편 수평확산계수 K_x 는 연직확산을 무시하고 근사적으로 구해보면⁶⁾

$$K_x = R\bar{s}/A \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} \quad (6)$$

이 되는데 그 값은 B점과 D점 사이에는 $1.2 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 의 값이 구해진다.

4. estuary의 분류

estuary의 특성을 종합해서 나타내는 방법으로 몇 가지 estuary 분류법이 있는데 그 중에 Hansen과 Rattray가 개발한 성층변수($\Delta S/\bar{S}$)와 순환변수($\Delta u/u_r$)를 사용한 분류법에 의하여 낙동강 estuary 관측점들의 특성을 살펴보자.

Hansen-Rattray의 분류(그림 15)로써 estuary의 type을 구분하면 4분류로 나눌 수 있다.⁷⁾

type 1에서는 순흐름은 모든 깊이에서 바다쪽으로 이루어지며, 상류쪽에서의 염분 운반은 확산에 의해서 이루어진다.

type 1을 다시 세분하면 type 1a와 type 1b로 나눌 수 있는데 type 1a에서는 미약한 성층이 형성되며, 단면 균일의 잘 혼합된 estuary에 해당된다.

type 1b에서는 상당한 성층이 형성된다.

type 2에서는 일정 깊이에서 역류가 있고 부분적으로 혼합된 estuary에 해당되고, advection과

표 2. B, C 및 D점에서의 난류도(turbulence)

station	depth (m)	flood	ebb	tidal
B	0.0	0.023	0.094	0.058
	1.0	0.019	0.096	0.058
	2.0	0.025	0.027	0.026
	3.0	0.020	0.014	0.017
	4.0	0.26	0.010	0.018
	5.0	0.040	0.002	0.021
	6.0	0.073	0.003	0.038
	7.0	0.085	0.004	0.044
	8.0	0.048	0.008	0.028
C	9.0	0.019	0.012	0.015
	0.0	0.032	0.011	0.023
	1.0	0.032	0.008	0.021
	2.0	0.034	0.008	0.023
	3.0	0.010	0.004	0.007
D	4.0	0.008	0.005	0.007
	0.0	0.010	0.010	0.010
	1.0	0.002	0.018	0.001
	2.0	0.002	0.012	0.011
	3.0	0.010	0.014	0.012
	4.0	0.005	0.008	0.006
5.0	0.008	0.031	0.021	

확산 양자에 의해 상류쪽으로 염분수송이 일어난다.

type 3에서는 염분의 운반이 주로 advection에 의해서 이루어지며 type 3b에서는 하층이 너무 깊어서 순환이 바닥까지 도달하지 못하는 곳으로 fjords에 해당된다.

type 4에서는 보다 강한 성층이 형성되며 염분 빼기형의 estuary에 해당된다.

낙동강 estuary를 성층변수 및 순환변수로써 분류해 보면, 그림15에서와 같이 B,C점은 부분적으로 혼합된 estuary(Partially mixed estuary)임을 알 수 있다.

앞에서 언급한 염분 분포의 제특성과 흐름의 제특성도 위의 사실을 잘 확인해 주고 있다.

5. 결 론

이상의 제 요건들을 종합하면, 낙동강 estuary는

가. 염분의 연직분포는 성층분포이다.

나. 상층 및 하층에서 강을 따라 염분의 수평분포 기울기가 존재한다.

다. 물 전체가 조석의 진동에 따라 왕복 진동한다.

라. 유속 특징은 2층류 구조를 나타낸다.

마. 조류 특성은 진행파와 정상파가 혼합된 형태로 나타낸다.

바. 염분의 확산은 연직혼합에 있어서는 entrainment보다 연직 확산이 더 우세한 것 같고 수평 혼합에 있어서는 확산작용보다 이류에 의한 혼합작용이 더 우세한 것으로 판단된다.

사. 제특성을 종합해 볼 때 낙동강 estuary는 부분적으로 혼합된 estuary(Partially mixed estuary)의 특성을 나타낸다.

그리고 보다 철저한 연구를 위해서 계절별 및 누년 조사자료가 필요한 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Rochford, D. J., 1957, Studies in Australian estuarine hydrology, I, Introduction and comparative features, Australian Journal of Marine and Freshwater Research, 2, 1-116.
2. Dyer, K. R., 1973, Estuaries : A physical introduction, 29-30.
3. Dyer, K. R., 1973, Ibid. 30.
4. Dyer, K. R., 1973, Ibid. 21.
5. Carstens, T., 1970, Turbulent diffusion and entrainment in two-layer flow American Society of Civil engineers, Journal of the waterways and harbour division, 96, WW1, 97-104.
6. Officer, C. B., 1976, Physical oceanography of estuaries, 192.
7. Officer, C. B., 1976, Ibid. 180.
8. Hansen, D. V., and Rattery, Jr. M., 1966, New dimensions in estuary classification, Limnology oceanography, 11, 319-326.

