

洛東江 河水의 混合 및 循環 過程에 關한 研究

申 鍾 相

A Study on the Mixing and Circulating Process
at the Mouth of Nakdong River

Chong-sang Shin



目 次

Abstract

Illustrations

1. 서 論

2. estuary의 일반특성

가. 염분특성

나. 유속특성

다. 유 量

라. 조석 프리즘 체적

3. 혼합과정의 특성

가. 연직혼합

나. 수평혼합

4. estuary의 분류

5. 결 論

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, the mixing process seems to be carried out dominantly by diffusion and advection.

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

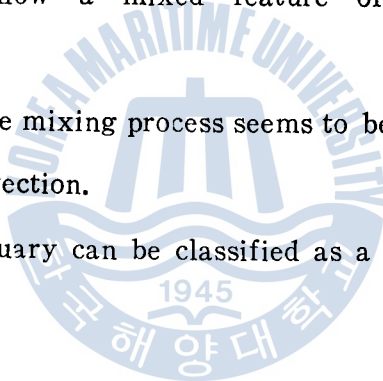


표 목 록

표 1. B,C 및 D점에서의 Reynolds 수 및 Froude 수13
 표 2. B,C 및 D점에서의 난류도(turbulence)13

그 립 목 록

그림 1. 연구수역.....14
 그림 2. B점에서의 염분 연직 분포15
 그림 3. C점에서의 염분 연직 분포15
 그림 4. D점에서의 염분 연직 분포15
 그림 5. B점에서의 염분 시간 변화16
 그림 6. C점에서의 염분 시간 변화16
 그림 7. D점에서의 염분 시간 변화16
 그림 8. B점에서의 유속 시간 변화17
 그림 9. C점에서의 유속 시간 변화17
 그림 10. D점에서의 유속 시간 변화17
 그림 11. B점에서의 유속 연직 분포18
 그림 12. C점에서의 유속 연직 분포18
 그림 13. D점에서의 유속 연직 분포18
 그림 14. 개방 수로에서의 흐름 특성도19
 그림 15. estuary 분류도.....19

1. 서 론

우리나라 여러 하천수의 estuary 특성에 관한 연구는 학문적인 관점에서 뿐만 아니라 실용적인 관점에서도 대단히 필요한 것이다.

낙동강은 우리나라 제일의 하천으로 estuary 연구에 가장 적절한 대상이라 할 수 있다.

특히 하구언 건설이 이루어져 곧 자연의 estuary 특성을 잃게 될 형편에 있기 때문에, 그 이전에 자연 그대로의 estuary 특성을 밝혀 두는 것은 역사적인 기록으로 중요함은 물론, 하구언 건설 전후의 변화를 비교 연구하는 일 등 학문적인 면에서도 중요하고, 생태환경 변화의 영향 연구 등 여러가지 실용적인 면에 있어서도 대단히 중요한 일이다.

그래서 저자는 1983년 11월 3일~6일(4일간)에 걸쳐, 그림 1의 지도에 표시된 B점, C점 및 D점에서 1조석 주기(13시간) 동안 매시간 마다 각 수심별(1m 간격)로 수온, 염분, 유향, 및 유속을 관측한 자료를 이용하여, 낙동강 하수의 혼합 및 순환과정의 특성의 1차적인 분석을 시도하여 본 논문을 작성하였다.

2. estuary의 일반특성

가. 염분특성

각 관측점에서의 수온 및 염분측정은 수질검사기 U-7형(HORIBA제)을 사용하여, 현장에서 채수 즉시 측정을 실시하였다.

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

보통 성층 변수의 값이 0.1보다 클 때에 염분의 연직분포가 성층을 이루고 있다

고 말하는데¹⁾, 이 기준에 따라 낙동강 하류의 물은 성층을 이루고 있음을 알 수 있었다(그림 2, 3 및 4).

특히 B점과 C점에서의 염분의 연직 분포도는 그림 2 및 3에서 보면 염분 기울기가 완만한 상하층과 그 중간의 기울기가 급해지는 혼합층으로 이루어진 성층구조를 확인할 수 있다.

한편, 염분의 강축을 따른 수평분포를 살펴보면, B점과 C점 사이에서는 수평 염분 분포의 기울기가 0.7ppt/km, C점에서 D점 사이에서는 3.8ppt/km로서 하류로 가면서 기울기가 크게 증가함을 나타내었다.

대체로 estuary는 상류에서 하류로 가면서 담수구역, 염분수평분포의 기울기가 완만하게 나타나는 구역, 조석의 영향이 강하게 나타나는 구역 및 해수구역 등 네 구역이 차례로 나타나는데, 경우에 따라서는 제2 및 제3구역이 혼합되어 나타나는 수도 있으며²⁾, 낙동강 하류의 경우는 이 경우에 해당되는 것으로 판단된다.

염분의 시간에 따른 변화를 살펴보면, 그림 5, 6 및 7에서와 같이 B점과 C점에서 염분은 조석보다 대략 1~2시간 정도 위상이 뒤져서 변화하고(즉, 염분의 극대 및 극소가 고조 및 저조보다 1~2시간 늦게 나타나고), D점에서는 위상차가 보다 작은 것을 알 수 있었다.

나. 유속의 특성

각 관측점에서의 유향 및 유속 측정은 유속계 CM-2형(TOHO DENTAN제)을 사용하였다.

그림 8, 9 및 10 등을 살펴보면, 낙동강 하류의 물은 조석에 따라 전 수심에 걸쳐 거의 같은 위상으로 왕복 운동함을 알 수 있었다.

그리고 조석과의 위상차이는 B점과 C점(강하구 안쪽)에서는 유속이 조석보다 약 1시간 앞서 있어, 조석파가 진행파의 성격을 강하게 나타내었고, D점에서는 2~3시간 앞서 있어, 정상파와 진행파의 혼합형의 성격을 나타내었다³⁾.

조석 주기동안의 평균 유속의 연직분포(그림 11, 12 및 13)는 B점과 C점에서 상

층은 하류쪽으로, 하층은 상류쪽으로의 흐름을 보여 2층류(two-layer flow)의 특성을 보여 주었다.

흐름의 특성을 나타내는 척도로서 Reynolds 수(Re)와 Froude 수(F) 등을 구한 것을 표 1에 실었고, 이에 근거하여 그림 14의 흐름 특성도에 의해 분류해 보면, 낙동강 하구에서의 흐름은 subcritically turbulent flow 임을 알 수 있었다.

다. 유 량

유량은 다음 식에 의해 구해진다⁴⁾.

$$R = \frac{1}{T} \int_0^T Au \, dt$$

여기서 A 는 조석에 따라 변하는 하수 단면적($A = \bar{A} + A_0 \cos(\omega t + \theta)$), u 는 유속($u = \bar{u} + U_0 \sin \omega t$), T 는 조석주기이다.

그러므로 평균 유량은 다음과 같이 표현된다.

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

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

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

정상과 ($\theta = 0$)일 경우에는

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

이 된다.

식 (1)로 부터 B점, C점 및 D점에서 한주기(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 구해졌다.

라. 조석 프리즘 체적

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

$$P = \int_0^{\frac{\lambda}{2}} A \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \cdot dx = \frac{A\lambda}{\pi} \quad (4)$$

적 (4)로 부터 B점, C점 및 D점에서의 조석프리즘 체적은 $6.4 \times 10^7 \text{m}^3$, $3.3 \times 10^7 \text{m}^3$, $8.2 \times 10^7 \text{m}^3$ 의 값이 구해 졌다.

3. 혼합과정의 특성

담수와 염수의 혼합은 연직방향의 혼합과 수평방향의 혼합으로 나누어서 생각할 수 있는데, 연직혼합은 entrainment와 연직 확산에 의하여 이루어지고, 수평방향의 혼합은 조류의 진동에 따른 이류(advection)에 의한 혼합과 수평 확산에 의한 혼합으로 이루어진다.

낙동강 estuary에서의 각 혼합과정들의 역할을 살펴보면 다음과 같다.

가. 연 직 혼 합

성층류(stratified flow)에 있어서의 염수와 담수의 혼합과정은 entrainment와 확산(diffusion) 과정에 의해서 이루어 지는데, entrainment란 난류의 정도가 보다 덜한 층의 수괴가 보다 더한 층으로 유입되는 일방 과정으로 설명되어지며, 두 층간의 속력차가 클수록 entrainment 과정은 활발히 이루어진다.

그리고 하층으로 부터 상층으로 유입되는 물의량으로 말미암아 하구로 내려 갈수록 상층의 유량이 증가되어 estuary 내의 흐름은 2층류를 형성한다.

반면, 확산과정은 두층의 경계면을 통하여 꼭 같은 량의 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 나타나는데, 이들의 기여도의 비는 군사적으로 하천유량(R)과 조석프리즘 체적(P)의 비로 나타난다⁵⁾.

낙동강 하구에서의 조석 프리즘 체적에 대한 하천유량의 비는 앞서 구한 값에서

B점과 C점에서 0.1임을 알 수 있는데, 이는 여기서의 혼합과정에 있어서 entrainment의 역할보다는 diffusion의 역할이 큼을 나타내고 있었다.

entrainment와 확산의 역할을 비교하는 또 하나의 척도로 수심각층의 난류도(turbulence)를 계산한 것이 표2에 실려 있다.

연직확산계수 K_z 는 수평확산을 무시하고 근사적으로 구하면⁶⁾

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

로 구해질 수 있는데 B점과 C점 사이에서는 그 값이 2.8cm²/sec, C점과 D점 사이에서는 60.8cm²/sec로 계산되었다.

이 값은 확산의 역할이 우세한 estuary인 Mersey Narrows 등에서의 값들과 비슷함을 알 수 있다⁷⁾.

나. 수평 혼합

수평혼합은 앞에서 말한 대로 이류와 확산의 두 과정에 의해서 이루어지는 바 낙동강 estuary에서는 물의 전용량이 조류 진동하는 특성을 보여 주는데, 이는 이류에 의한 혼합이 상당히 크다는 것을 뜻한다.

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

그리고 이류에 의한 염분 운반 ($F_a = \langle S \rangle_{yztT} \langle V \rangle_{yztT}$)과 확산에 의한 염분 운반 ($F_d = \langle SV \rangle_{yztT} - \langle S \rangle_{yztT} \langle V \rangle_{yztT}$)을 구해 보면⁸⁾, B점에서는 117ppt·cm/sec, 62ppt·cm/sec, D점에서는 286ppt·cm/sec, 110ppt·cm/sec의 값이 각각 계산되었다.

강축을 따른 확산 계수 D 를 구해보면

$$D = -F_d / \langle \partial \langle S \rangle_{yztT} / \partial x \rangle \quad (6)$$

이 되는데 B점과 D점 사이에서 그 값은 3.0×10^6 cm²/sec로 계산되었다.

이 값은 Hudson Estuary 등에서의 값과 비슷함을 알 수 있다⁹⁾.

4. estuary의 분류

estuary의 특성을 종합해서 나타내는 방법으로 몇가지 estuary 분류법이 있는데, 그 중에 Hansen과 Rattray가 개발한 정층변수($\Delta S/S$)와 순환변수($\Delta u/u_T$)를 사용한 분류법¹⁰⁾에 의하여 낙동강 estuary 관측점들의 특성을 살펴보았다.

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

그중 type 1에서는 순흐름은 모든 깊이에서 바다 쪽으로 이루어지며, 상류쪽에서의 염분운반은 확산에 의해서 이루어진다.

type 1을 다시 세분하면 type 1a와 type 1b로 나눌 수 있는데, type 1a에서는 미약한 정층이 형성되며, 수평으로 균일한 잘 혼합된 estuary에 해당된다.

type 1b에서는 상당한 정층이 형성된다.

type 2에서는 일정 깊이에서 역류가 있고, 부분적으로 혼합된 estuary에 해당되며, 이류와 확산에 의해 상류쪽으로 염분 운반이 일어난다.

type 3에서는 염분의 운반이 주로 이류에 의해서 이루어지며, type 3b에서는 하층이 너무 깊어서 순환이 바다까지 도달하지 못하는 곳으로 fjords에 해당된다.

type 4에서는 보다강한 정층이 형성되며, 심분 계기형의 estuary에 해당된다.

낙동강 estuary를 Hansen과 Rattray의 분류법에 따라 분류해 보면, 그림 15에 서와 같이 B 및 C점은 type 2에 해당되는 부분적으로 혼합된 estuary(partially mixed estuary)임을 알 수 있다.

앞에서 언급한 염분 분포의 계층성과 흐름의 세 특성도 위의 사실을 잘 확인해 주고 있다.

5. 결 론

이상의 제 조건들을 종합하여, 낙동강 estuary의 특성에 관하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 가. 염분의 연직분포는 성층분포를 하고 있다.
- 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 entrainment 보다 연직 확산이 더 우세하고 수평 혼합에 있어서는 확산 작용보다 이류에 의한 혼합작용이 더 우세한 것으로 판단된다.
- 사. 제 특성을 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.

본 논문이 나오기 까지 바쁘신데도 시종일관 지도해 주신 유홍선 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

아울러 그동안 저를 가르쳐 주시고, 물심양면으로 도움을 주신 여러 교수님들과 학군단장님, 그리고 판촉작업에 참여한 학생여러분께 감사합니다.

참 고 문 헌

1. Hansen, D.V., and Rattray, Jr. M., New dimensions in estuary classification, *Limnology and Oceanography*, 11, 1966, pp. 319-326.
2. Rochford, D.J., Studies in Australian estuarine hydrology, I, Introduction and comparative features, *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 2, 1957, pp. 1-116.
3. Carstens, T., Turbulent diffusion and entrainment in two-layer flow, American Society of Civil Engineers, *Journal of the Waterways and Harbour Division*, 96, WW1, 1970, pp. 97-104.
4. Dyer, K.R., *Estuaries: A Physical Introduction*, 1973, pp.29-30.
5. Dyer, K.R., *ibid.* p.21.
6. Officer, C.B., *Physical Oceanography of Estuaries*, 1976, p.192.
7. Bowden, K.F., Mixing processes in a tidal estuary, *International Journal of Air and Water Pollution*, 7, 1963, pp.343-356.
8. Posmentier, E.S., and Raymond, J.M., Variations of longitudinal diffusivity in the Hudson Estuary, *Estuarine and Coastal Marine Science*, 8, 1979, p.556.
9. Posmentier, E.S., Raymond, J.M., *ibid.* p. 559.
10. Hansen, D.V., and Rattray, Jr. M., *op. cit.* pp. 319-326.

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

station	Re		F	
	flood mean	ebb mean	flood mean	ebb mean
B	2.09×10^6	3.69×10^6	0.244	0.359
C	1.26×10^6	1.76×10^6	0.326	0.509
D	1.19×10^6	1.58×10^6	0.400	0.529

표 2. B, C 및 D점에서의 난류도(turbulence)

station	depth(m)	turbulence		
		flood mean (m^2/sec^2)	ebb mean (m^2/sec^2)	tidal mean (m^2/sec^2)
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	0.026	0.010	0.018
	5.0	0.04	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
	9.0	0.019	0.012	0.015
C	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
	4.0	0.008	0.005	0.007
D	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

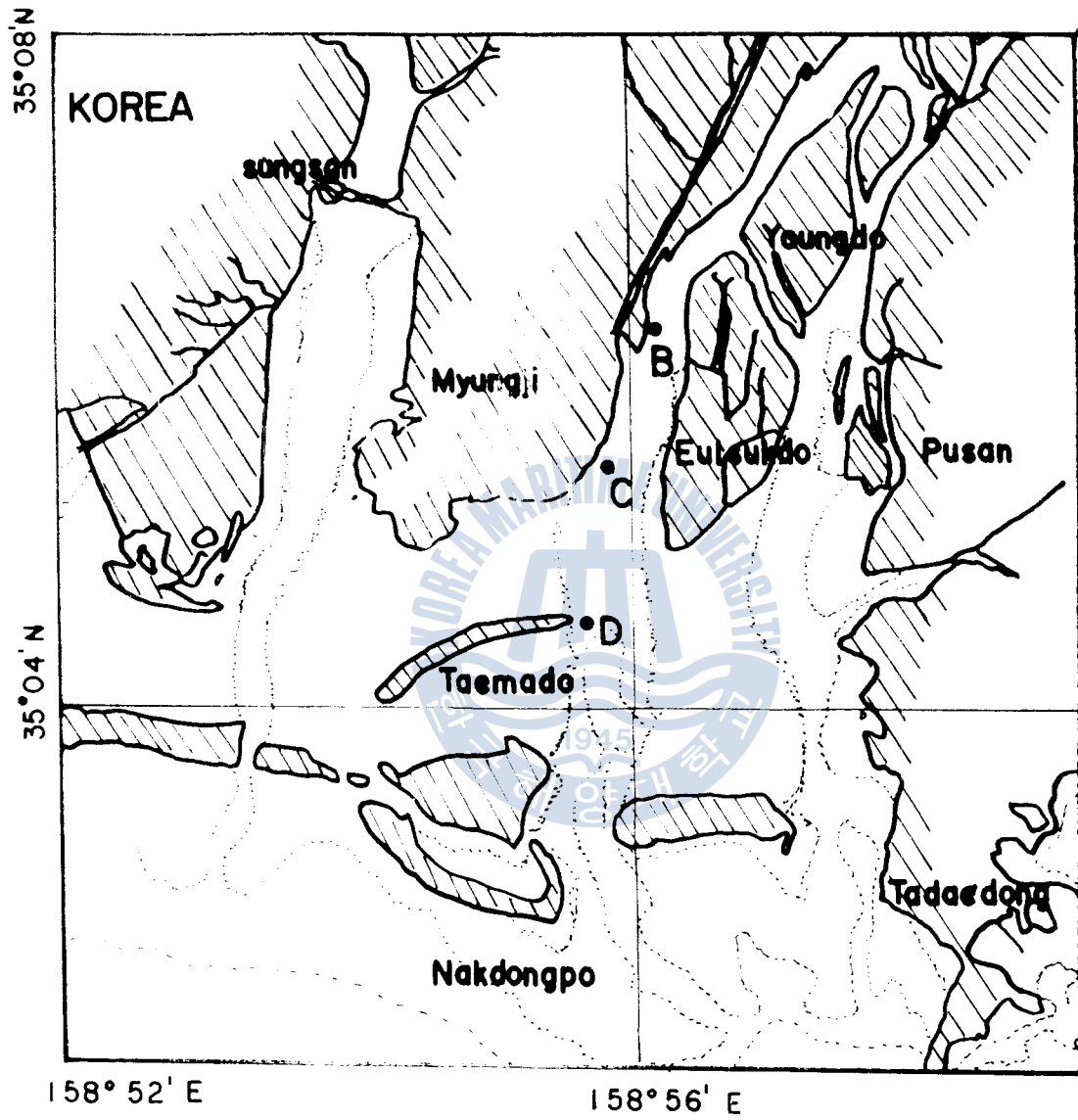


그림 1. 연구구역

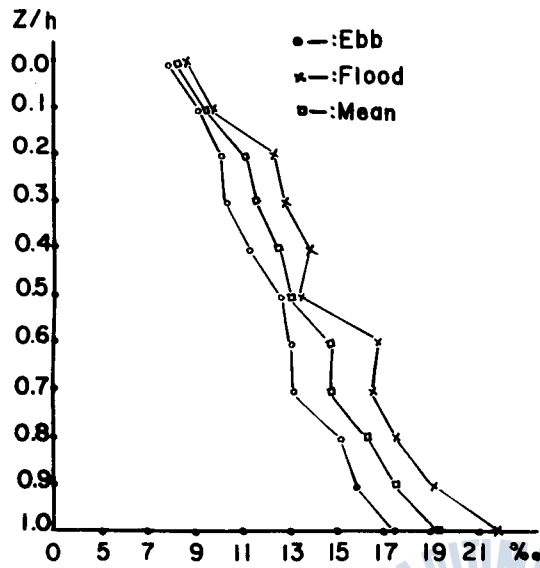


그림 2. B점에서의 염분연직분포

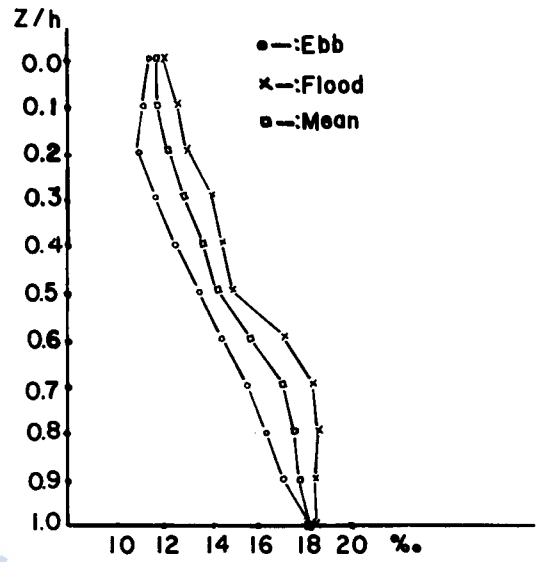


그림 3. C점에서의 염분연직분포

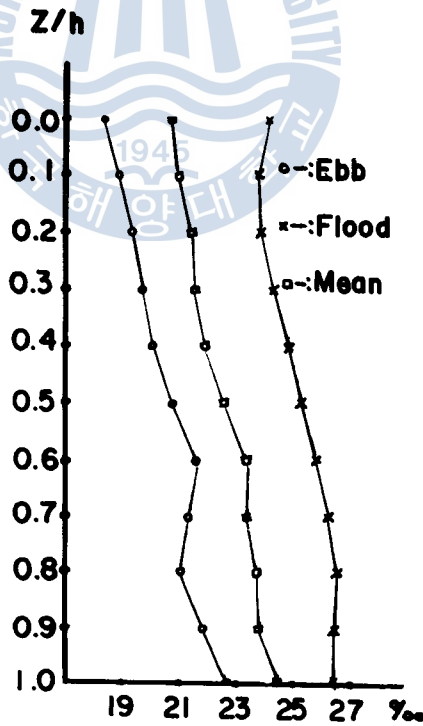


그림 4. D점에서의 염분연직분포

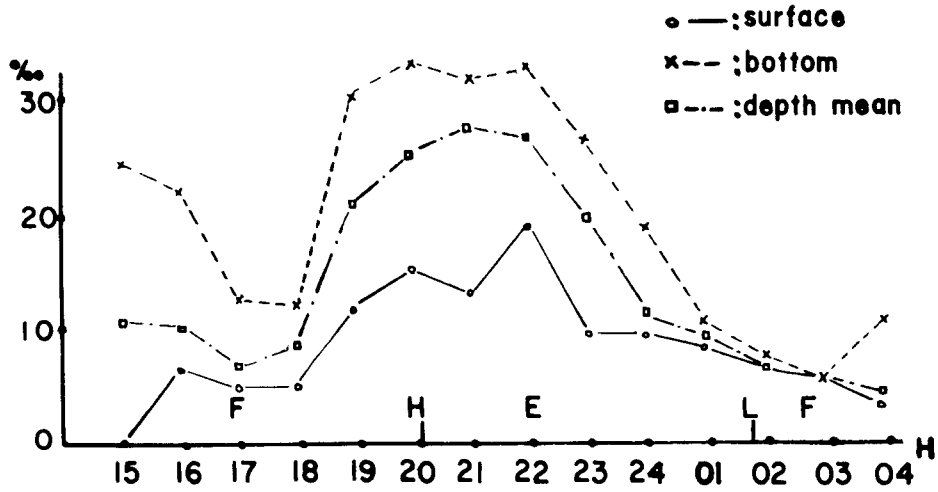


그림 5. B점에서의 염분시간변화 (H: high tide, L: low tide, F: flood, E: ebb)

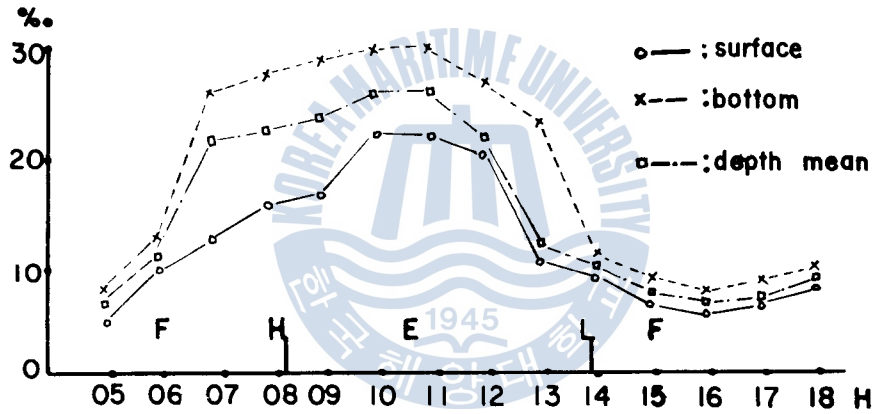


그림 6. C점에서의 염분시간변화

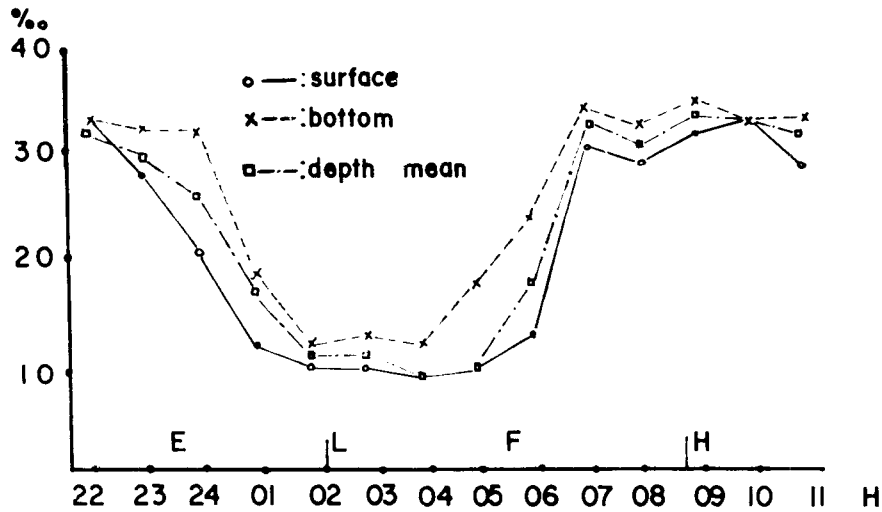
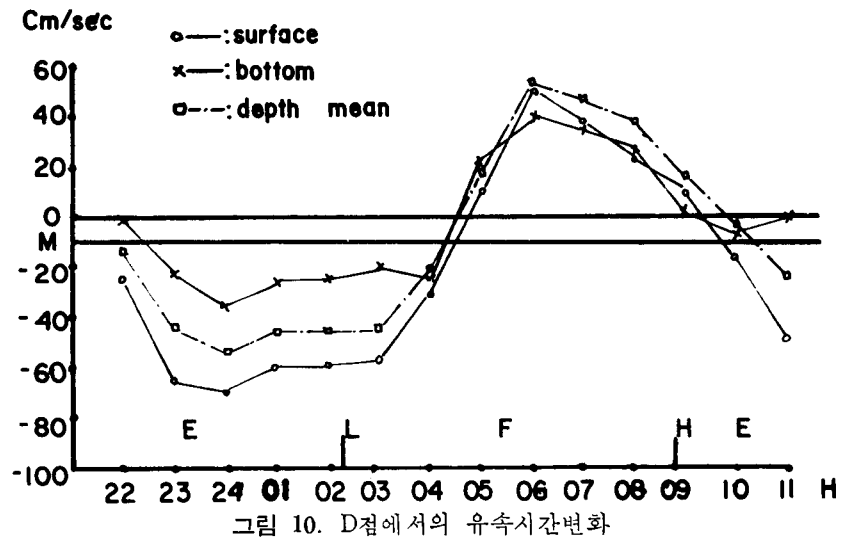
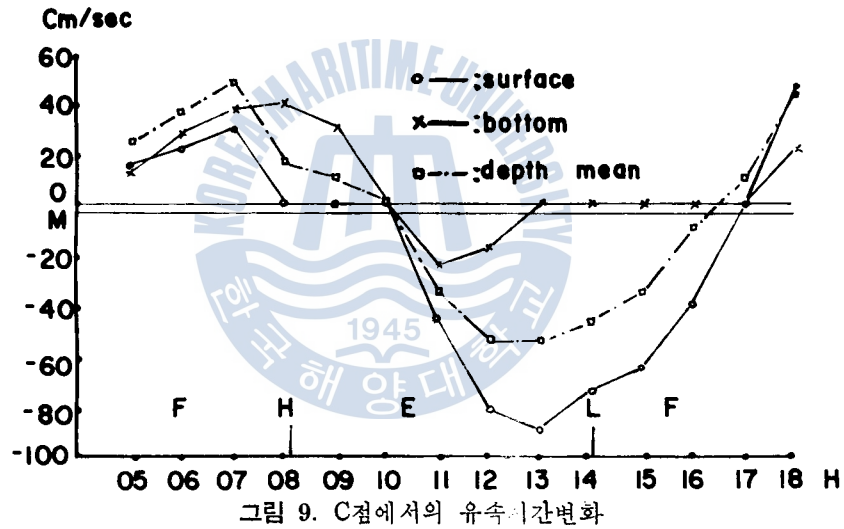
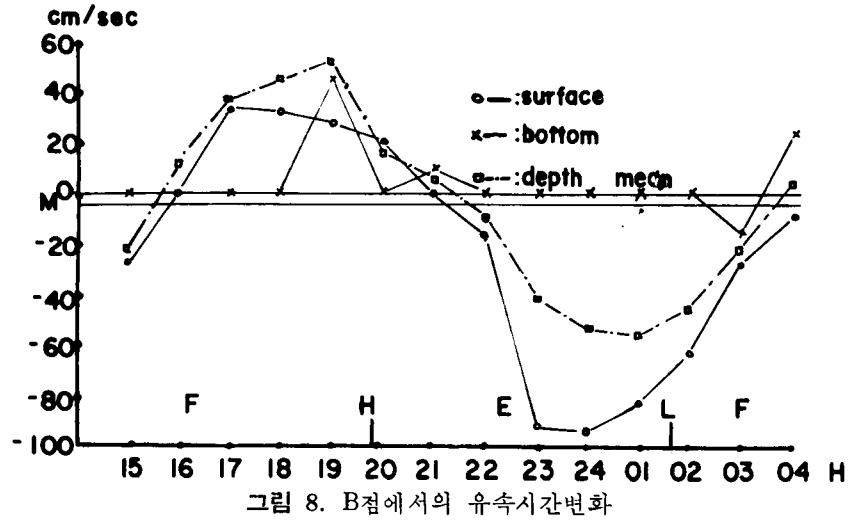


그림 7. D점에서의 염분시간변화



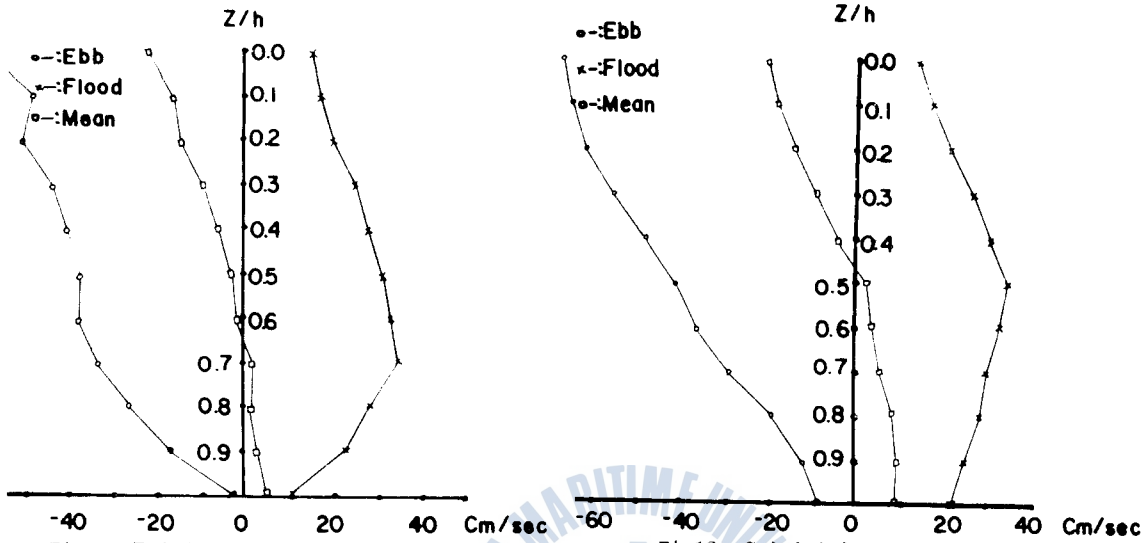


그림 11. B점에서의 유속연직분포

그림 12. C점에서의 유속연직분포

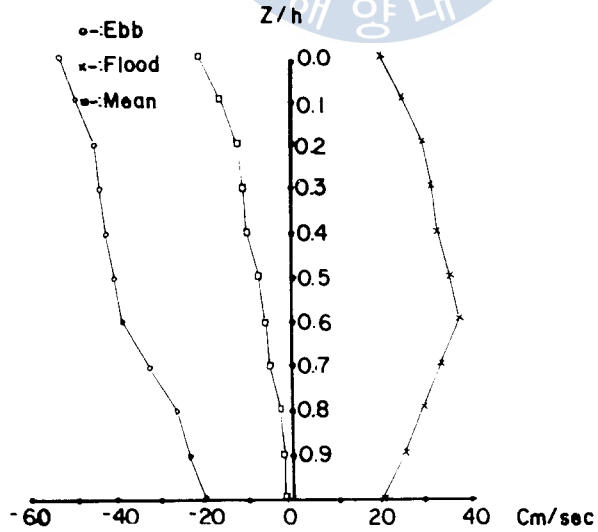


그림 13. D점에서의 유속연직분포

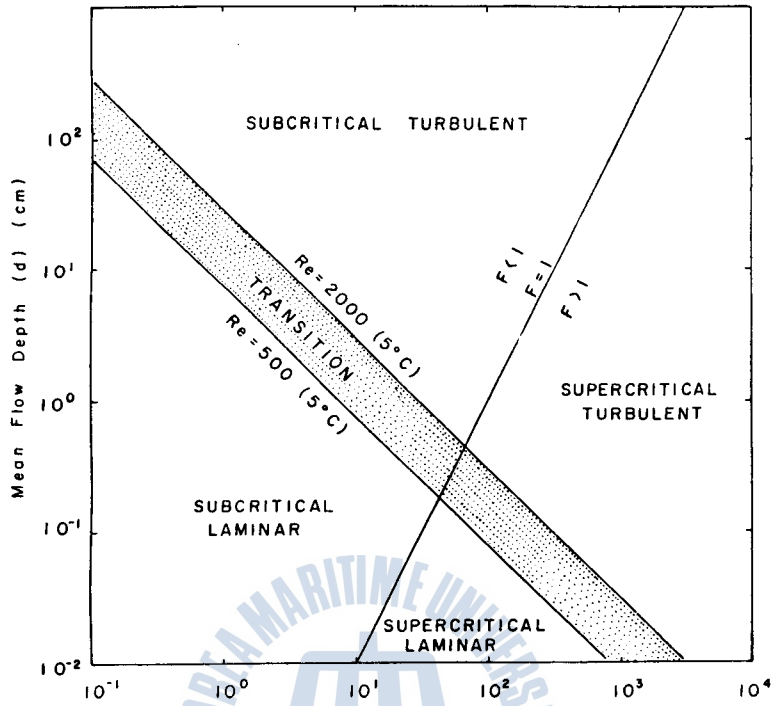


그림 14. 개방 수로에서의 흐름특성도

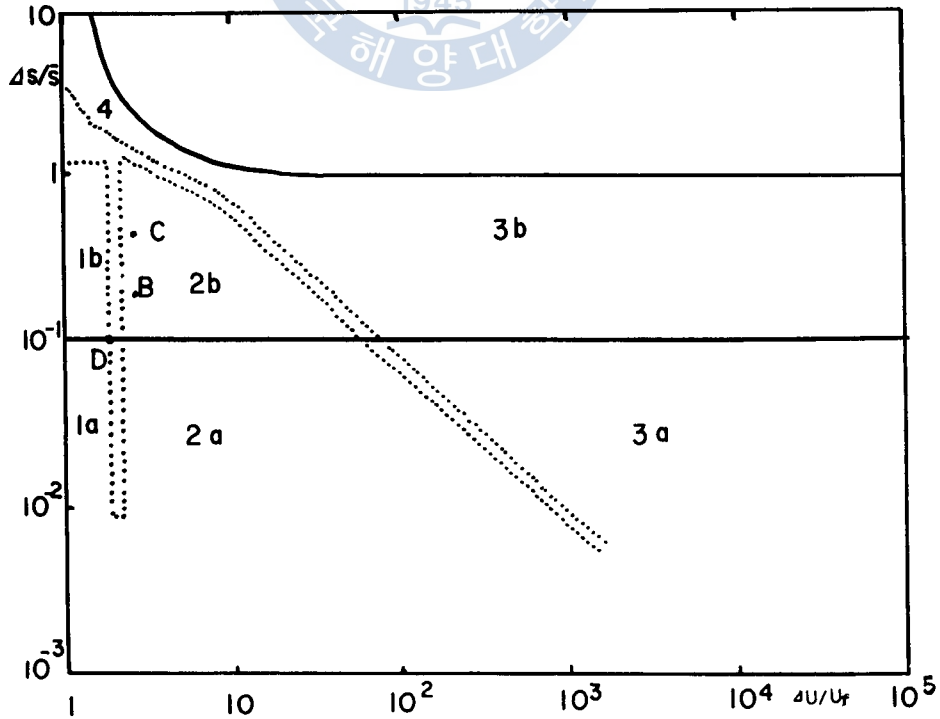


그림 15. estuary 분류도