

# 낙동강 하구에서의 하천수의 순환과 혼합의 물리적 특성

유홍선 · 민병언 · 김창제

A physical characteristics of circulation and mixing process at the mouth of the Nakdong river

*Yu, Hong Sun · Min, Byeong Eon · Kim, Chang Je*

## < 목 차 >

Abstract

1. 서 론
2. 염분 특성
3. 유속 특성

4. 혼합 특성
  5. 홍수기의 특성
  6. 결 론
- 참고문헌

## Abstract

This is a result of a series of observations on the Nakdong estuary carried out by the authors since 1982.

As the results of the observations in this year, the additional items of characteristic features on the mixing and circulation process in the estuary were found as follows:

At the flood stage, the salt wedge ranges from the mouth of the river to the junction of two tributaries near the Nakdong Bridge.

The mixing and diffusion occur mainly at the downstream of this junction.

The salt is transported upstream by advection and the stratification is reinforced.

Thus, the vertical mixing is carried out mainly by the diffusion.

At the ebb stage, the entrainment is vigorous due to the shear flow, the stratification is weakened, and the flow becomes well-mixed and flows out to the sea.

## 1. 서 론

수년간 계속되어 온 본 대학 연구팀의 낙동강 하구에 대한 해양학적 연구의 일환으로 1984년에는 다음과 같이 3차에 걸쳐 여러가지 관측을 실시하였다.

제 1차 관측은 1984년 3월 29일~4월 1일(갈수기이며 동쪽 지류가 하구둑 공사로 인하여 막

힌 5월 이전)에 그림 1의 P, N, A, A' 및 C의 관측점들에서, 제 2차 관측은 1984년 8월 27일과 28일(집중호우 1일후)에 같은 그림 1의 A, C 및 D 관측점들에서 각각 13시간에 걸쳐 매 시간마다 각 수심별(1m 간격)로 표층에서 바닥까지 유향, 유속, 전기전도도 및 수온등을 측정하였고, 제 3차 관측은 1984년 10월 25일 고조후 약 2시간 40분인 11시 25분에 그림 1의 N 관측점에서 20~80cm 수심에 drogue를 띄우고 이를 추적해 가면서 그림 1의 N, A, B, C, D, E, F, G 등 각 관측점들에서 수온과 전기전도도를 1m 간격으로 수심별로 관측하였고 동시에 Rhodamine 염료의 확산 실험을 실시하였다.

제 1차 관측의 분석 결과는 전년도(1983년도) 연구와 같은 방법(정선관측)으로 시도하였기 때문에 결론도 비슷하였다.

제 2차 관측은 집중 호우가 있은지 1~2일 후에 관측된 자료이어서 estuary의 혼합 특성을 살펴보는 데는 유용하지 않았으나 낙동강 하구에서의 홍수기의 특징을 보여주는 자료라고 생각되어 기록을 위해 간단히 수록하였다.

끝으로 제 3차 관측은 처음 시도하는 방법으로서 estuary의 혼합특성을 더욱 철저히 살펴보고자 시도한 것이다. 금년에는 배와 장비등의 여건이 여의치 못하여 썰물 단계에서의 관측만 실시하였다.

관측점들은 P는 김해공항 입구 앞, N은 낙동대교 1km 하류, A는 강이 두 支流로 갈라지고 난 후의 영도상단, A'는 A에서 1.2km 하류에서 서쪽 뚝 쪽이며 A와 A' 사이에는 강의 중앙부의 河床에 강축 방향으로 길게 저조시에는 수면위로 드러나는 砂丘가 형성되어 강의 흐름을 양분하고 있다. 그래서 A와 A'는 가까이에 있으면서도 유속 및 염분특성을 달리하고 있다. B는 하구둑 건설 예정지, C는 西岸 강둑의 끝부분 초소 앞, D는 매마등 앞, E는 장자도 앞, F는 새동 앞, G는 하구의 水中砂丘 바로 밖에 있는 낙동포안의 관측점들이다.

이상의 관측 결과를 정리하여 본 논문에서는 낙동강 하구에서의 순환특성과 혼합특성을 알아보았다.

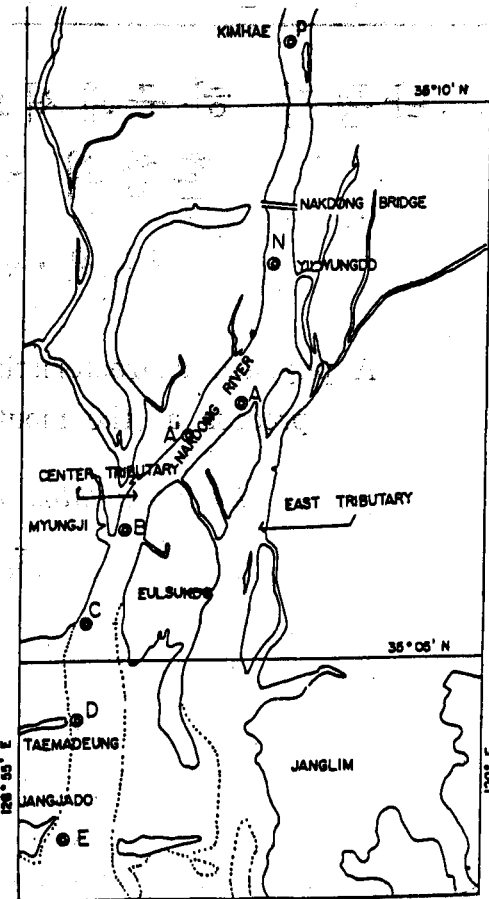


그림 1. 연구 수역

## 2. 염분 특성

제 1차 관측시에 각 관측점에서 성층계수( $\Delta S/S$ )를 계산해 보면 P에서 0.15, N에서 0.31, A에

서 0.125, A'에서 0.095, C에서 0.16으로, A'를 제외하면 모두 0.1보다 커서 염분의 연직 분포가 성층을 이루고 있음을 나타낸다.<sup>2)</sup>(그림 2, 3, 4, 5, 6)

위치 A, A' 및 C는 모두 낙동강 하구의 중앙 지류에 있는데 이 支流가 東支流와 갈라지기 전의 상류에 있는 P 및 N과 구별된다. 같은 지류에서는 하류 쪽으로 갈수록 성층계수가 커지는 특성이 나타난다(A 및 C와 P 및 N의 비교).

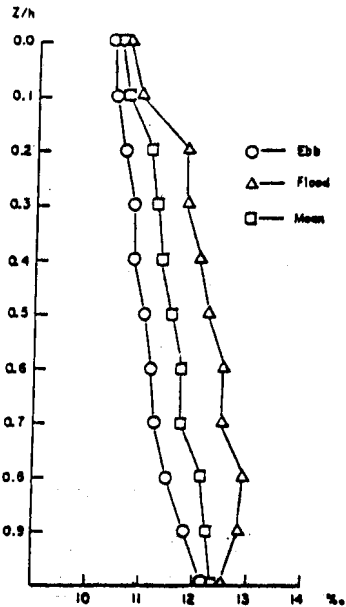


그림 2. P에서의 염분 연직분포(1984. 3. 30)

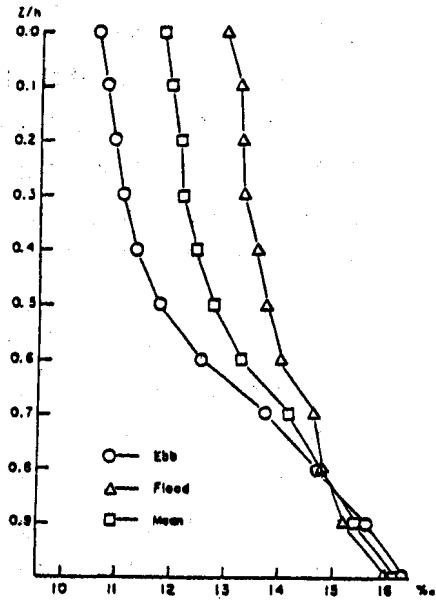


그림 3. N에서의 염분 연직분포(1984. 3. 31)

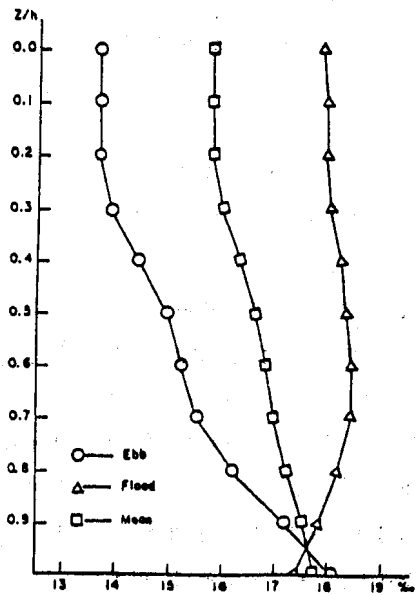


그림 4. A에서의 염분 연직분포(1984. 3. 31)

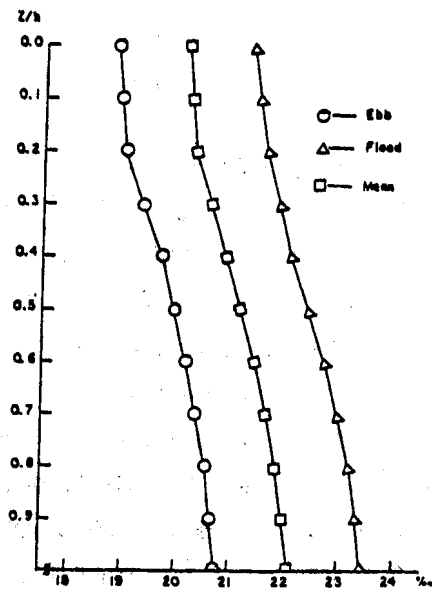


그림 5. A'에서의 염분 연직분포(1984. 3. 30)

우선, N에서 큰 성층이 나타나는 이유는 수심이 N에서 8.5m 정도로 깊은데 지류가 갈라지면서 A에서는 4m 정도로(제 1차 관측시) 급격히 감소하여 N의 저층수는 그 순환이 억제되며 따라서 조석주기 동안의 저층 염분 변화가 그다지 크지않게 되어(그림 9) N에서 큰 성층이 나타나는 것이라 설명할 수 있다. 그러나 비교적 염분차가 크지않은 중상층류가 얇은 수심의 A로 흘러 나가므로 A에서는 성층계수가 감소되어 있는 것으로 생각된다. 그리고 N에서 중앙지류로 갈라지는 부분에서 낙동강의 흐름은 A쪽으로 굽어서 흘러가므로 중앙지류의 상단에서는 동쪽의 유속이 강한데, 이 흐름이 B에 이르러 때에는 다시 서쪽으로 굽어서 B쪽의 유속이 강하게 되며 이 상태는 C까지 계속되는 것으로 관측된다. 따라서 A에서 A'에 이르는 부분에서는 동쪽의 흐름이 강한 대신 서쪽 부분에서는 어느 정도 흐름이 약한 停滯流의인 성격을 나타내므로 퇴적이 일어나 흐름의 중앙부에 강축을 따라 저조때에는 물위로 드러나는 砂丘가 형성되어 있으며 이 사구가 東流와 西流를 갈라놓게 된다. A'는 이 서류의 하단부에 해당되는 곳에 있고 따라서 정체류적인 특성 때문에 연직으로 잘 혼합된 상태를 나타낸다.

동지류가 막힌 후(하구 독 공사 진척으로 5월에 동지류가 막혔음)인 제 3차 관측에 의하면 A의 수심은 8.6m로 더 깊어지는 변화가 일어났다. 이것은 이 부근의 선박운항을 위한 준설 때문에 생긴 하상변화인데 제 3차 관측시 중앙지류 중심부의 중앙사구 부분에도 하상변화가 있었는지는 확인해 보지 못했다.

제 3차 관측시의 성층계수는 N에서 0.78, A에서 0.80, B에서 0.80, C에서 0.42, D에서 0.41, E에서 0.01, F에서 0.00 등으로 N에서 D까지는 제 1차 관측때보다 월등히 커져 있음을 알 수 있고 D관측점 밖에서는 잘 혼합된 estuary의 특성을 보여주고 있다.

그림 7을 보면 수심이 깊은 N에서 B까지에서는 중층에 강한 염분약층이 형성되어 있고 저층에는 고염분의 물이 자리잡고 있음을 알 수 있다. drogue를 띄운 시간이 고조후 2시간 40분이라 전년도 연구결과<sup>2)</sup>나 금년 제 1차 관측결과로 비추어 볼 때 대체로 轉流가 일어난 직후에 해당되며 따라서 가장 고염분을 나타낼 때에는 하지만 표면의 값이 제 1차 관측때의 값(그림 3, 4, 6)인 대략 14~18 ppt 정도보다 훨씬 낮은 11~12 ppt 정도를 나타내고 있는데 비해서, 바닥염분이 제 1차 관측때(15~18 ppt 정도)보다 훨씬 큰 25~30 ppt를 나타내고 있다(그림 7). 정점관측을 하지 않았기 때문에 분명히 말할 수는 없지만 전년도에나 제 1차 관측때에는 볼 수 없었던 변화가 나타났음을 알 수 있다.

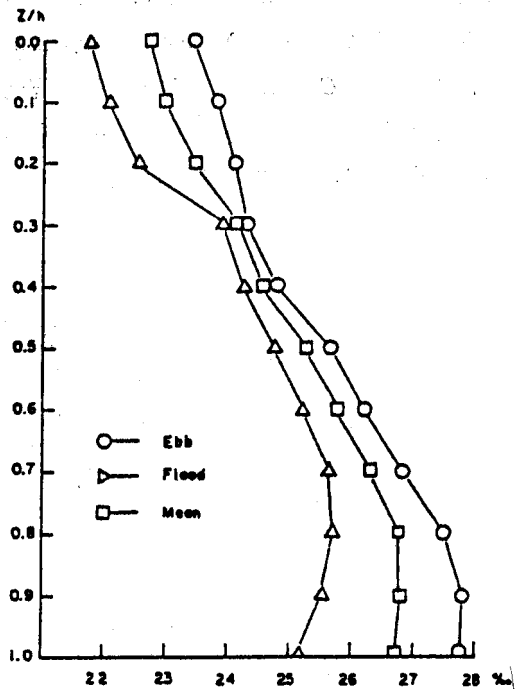


그림 6. C에서의 염분 연직분포(1984. 3. 29)

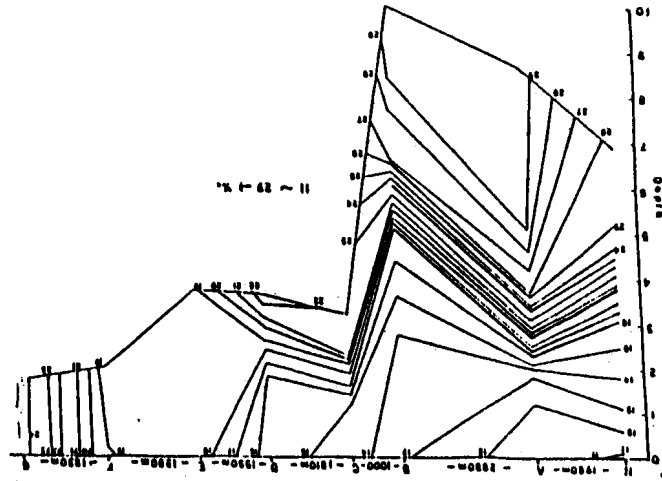


그림 7. Drogue 추적시의 염분 연직분포(1984. 10. 25.)

앞으로 더 관측해 보면 사실여부를 확인할 수 있겠지만 제 1차 관측결과를 설명할 때와는 달리 A에서 B까지의 수심이 동쪽지류를 막기 전보다 더 깊어진 것이 이와 같은 현상을 설명할 수 있는 근거가 될 수 있을 것이다. 즉, B에서 C로 가면서 갑자기 수심이 얕아지므로 이 바닥지형이 N에서 B까지의 저층수를 가두어서 순환이 그다지 크지 않은 準停滯水로 만들기 때문에 이 저층수가 특이한 고염분을 나타내는 것이라 생각된다. 그리고 동지류에서 막힌 곳까지의 부분은 完全停滯水(tidal trapping)가 되어 있으므로 이 부분의 물도 N, A 및 B의 수심 깊은곳의 고염분수의 존재를 설명하는데 중요한 인자가 될 것이다.

제 1차 관측자료에서 염분의 시간변화(그림 8, 9, 10, 11, 12)는 潮位변화보다 1/4 주기만큼 뒤지는 보통의 특성을 나타내고 있는데 유속의 시간변화와 비교하여 볼 때 특히 썰물에서 밀물로 전류되는 시간 전후에는 상하층의 염분차가 작고 밀물에서 썰물로의 전류시간 전후에서는 상하층의 염분차가 크다. 이것은 대체로 밀물기간에 성층이 강하게 형성되는 반면에 상층류와 하층류의 유속차가 큰 썰물기간에는 유속이 다른 층류(shear flow)에 의한 혼합이 강하게 일어나서 성층이 약해지는 것으로

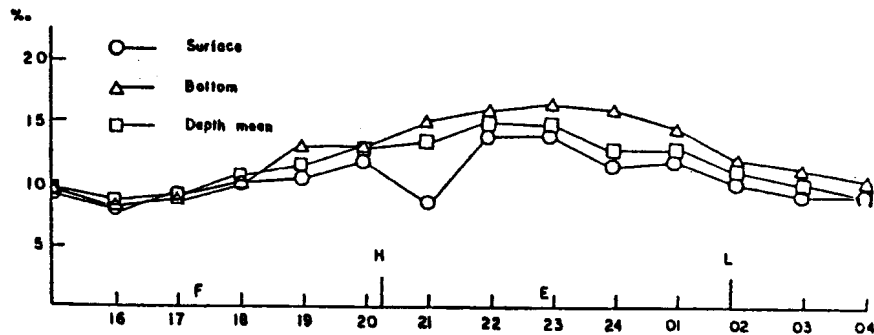


그림 8. P에서의 염분 시간 변화(1984. 3. 30)

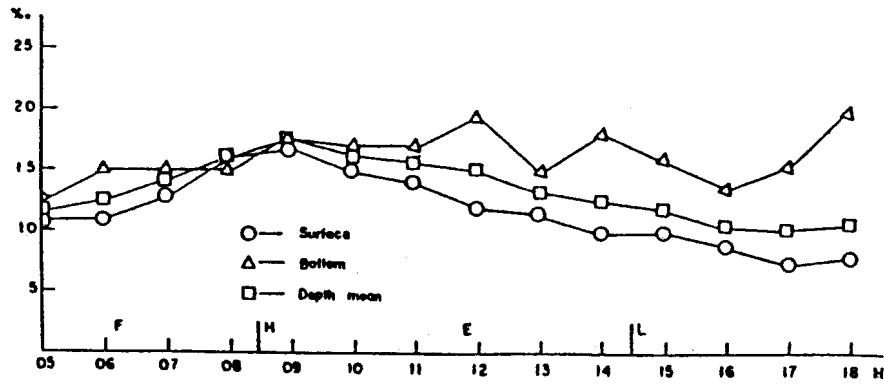


그림 9. N에서의 염분 시간 변화(1984. 3. 31)

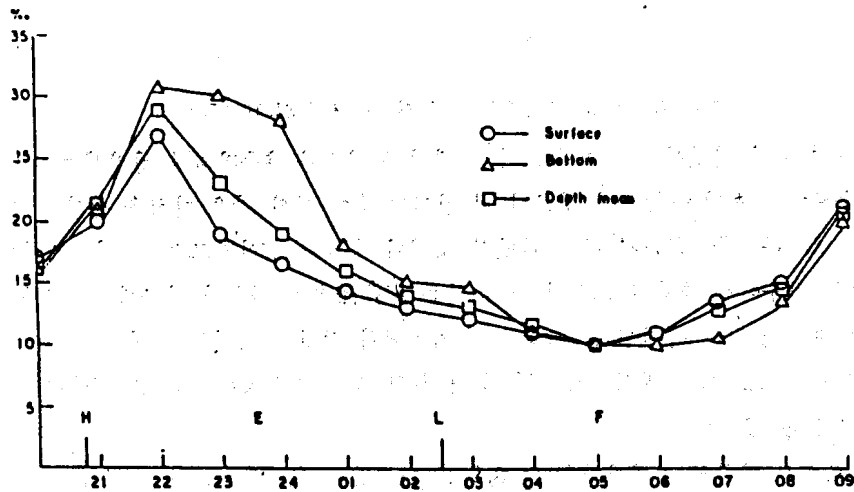


그림 10. A에서의 염분 시간 변화(1984. 3. 31)

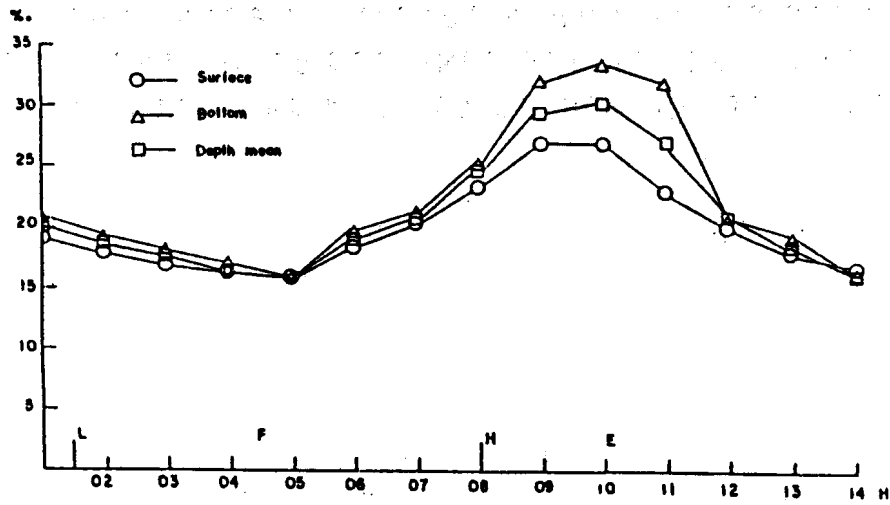


그림 11. A'에서의 염분 시간 변화(1984. 3. 30)

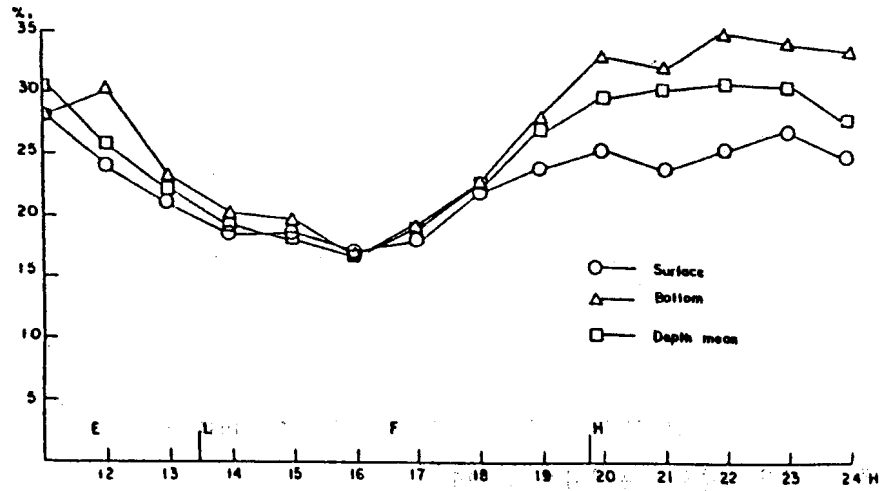


그림 12. C에서의 염분 시간 변화(1984. 3. 29)

판단된다.

한편, 강축을 따라서의 평균 염분의 기울기는 P와 N 사이에서 0.5 ppt/km, N과 A 사이에서 0.7 ppt/km, A와 C 사이에서 2.5 ppt/km로 상류부에서는 완만하고 하류쪽으로 갈수록 급격해져 있는 것을 알 수 있다.

제 1차 관측 자료에서 관측점 P, N, A 및 C에서의 관측이 동시관측이 아니라 1 내지 4 반일 주조 주기(즉, 최대 2일 정도)의 시차를 두고 관측된 자료들이지만 이 관측기간 동안에 이곳에서의 estuary 특성이 조석에 따른 주기적 변화 이외에는 큰 변화가 일어나지 않는다고 보고 각 관측점에서 조석주기에 있어서의 동일위상 시기에 관측한 값을 동시에 관측한 것으로 간주해서 염분이 최대가 되는 또는 성층이 최대가 되는 밀물에서 셀물로의 전류시의 염분 분포도와 그 반대의 위상시의 염분 분포도를 각각 그림 13과 14에 나타내었다. 이에 대한 해석은 혼합특성 부분에서 언급하고자 한다.

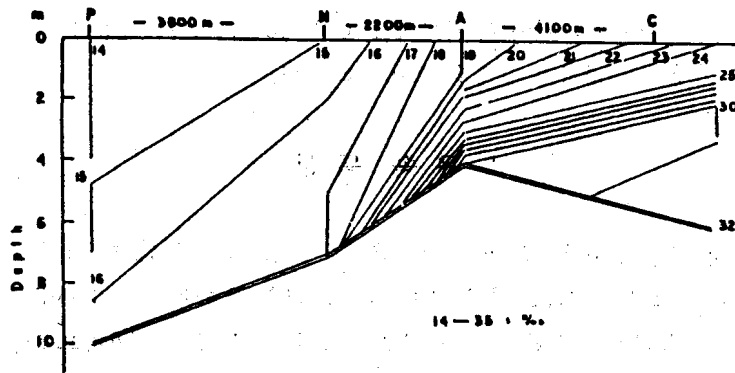


그림 13. 밀물에서 셀물로의 전류시의 염분 분포(1984. 3)

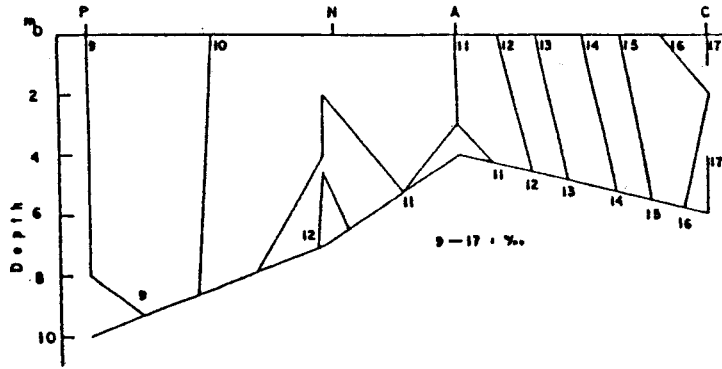


그림 14. 썰물에서 밀물로의 전류시의 염분 분포(1984. 3)

제 3차 관측자료에서 표층의 염분변화를 그림 15에 나타내었다. 실선은 최소 자승법에 의해서 그려본 변화곡선이다( $S=9.73exp[0.00327t]$ ). 이때에 강측 방향으로의 시간에 따른 염분 기울기는 N과 A 사이에서  $0.2 \text{ ppt/km}$ , A와 B 사이에서  $0.6 \text{ ppt/km}$ , B와 D 사이에서  $0.6 \text{ ppt/km}$ , D와 F 사이에서  $1.1 \text{ ppt/km}$ 로 하류로 가면서 기울기가 증가함을 알 수 있다.

제 3차 관측에서 Drogue를 운반하는 물덩어리가 하류로 내려가면서 시간에 따라 염분이 증가하는율은 N과 A 사이에서  $0.3 \times 10^{-3} \text{ ppt/sec}$ , A와 B 사이에서  $0.7 \times 10^{-3} \text{ ppt/sec}$ , B와 C 사이에서  $0.4 \times 10^{-1} \text{ ppt/sec}$ , C와 D 사이에서  $0.8 \times 10^{-1} \text{ ppt/sec}$ , D와 E 사이에서  $0.6 \times 10^{-1} \text{ ppt/sec}$ , E와 F 사이에서  $0.7 \times 10^{-1} \text{ ppt/sec}$ , F와 G 사이에서  $0.9 \times 10^{-1} \text{ ppt/sec}$ 이었다. 이 경우도 대체로 변화율이 하류쪽으로 가면서 증가하는 경향을 보여주고 있다.

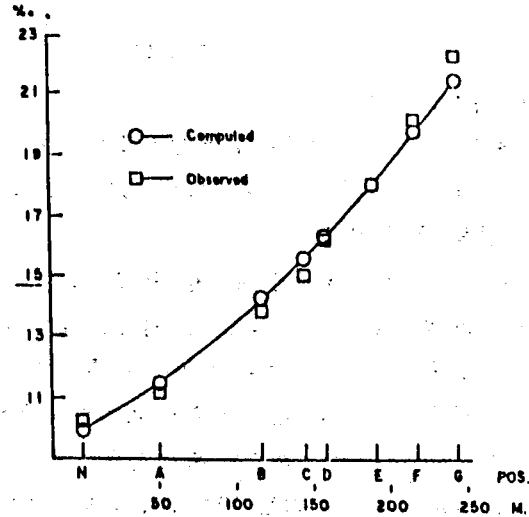


그림 15. Drogue 추적시의 표면 염분 기울기 (1984. 10. 25)

### 3. 유 속 특 성

제 1차 관측자료에서 구한 순환변수( $\Delta u/\bar{u}$ )는 P에서 2.5, N에서 12.5, A에서 1.16, A'에서 0.89, C에서 2.86이다. 그림 16, 19, 20에서 보면 平均流들은 상층에서는 下向流를 하층에서는 上向流를 나타내고 있는데 N에서는 특히 상층과 하층의 유속이 큰 차이를 가지므로 순환변수가 월등히 크게 나타나고 있다. P에서 평균류는 전체적으로 下流向이 되어 조석영향이 약하게 나타남을 알 수 있고(그림 16), N에서는 썰물때에도 저층류는 上向의 흐름을 보여주고 있다. 대신에 표층류



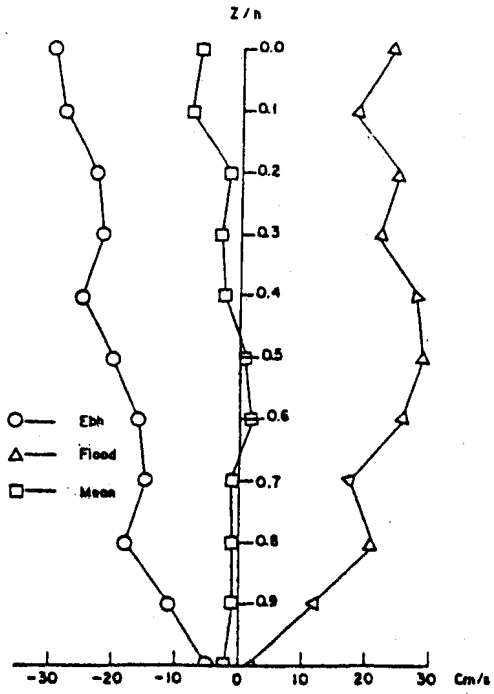


그림 16. P에서의 유속 연직분포(1984. 3. 30)

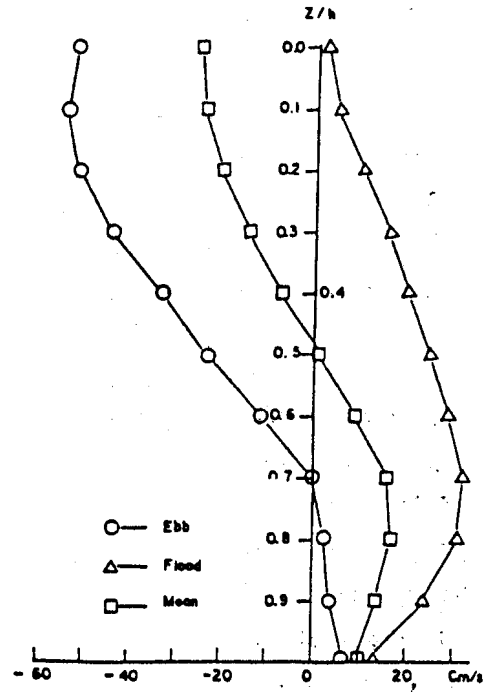


그림 17. N에서의 유속 연직분포(1984. 3. 31)

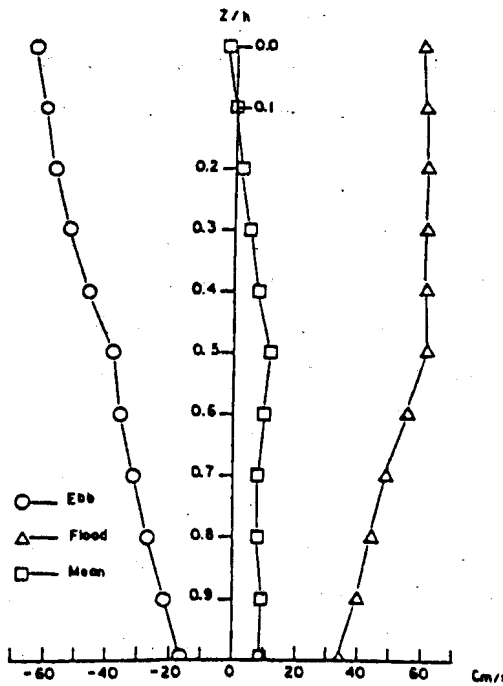


그림 18. A에서의 유속 연직분포(1984. 3. 31)

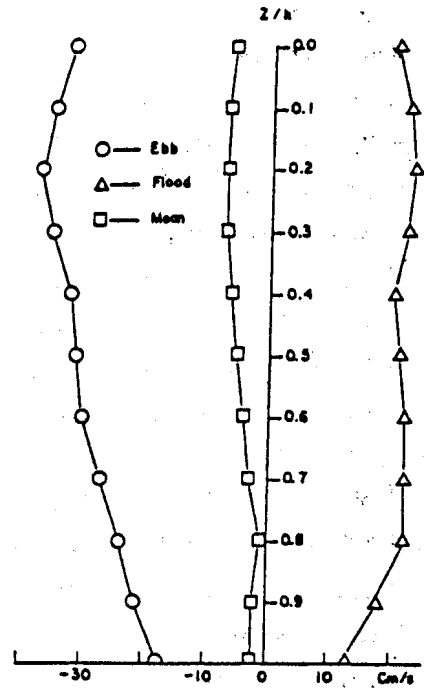


그림 19. A'에서의 유속 연직분포(1984. 3. 30)

는 밀물 때라도 상향류가 강하지 못함을 나타내고 있다(그림 17). 이것은 수심이 깊으며 강이 갈라지게 되는 이 부근에서 특이한 순환이 이루어지고 있음을 나타내는 것이다. 우선 강물의 흐름이 우세한 상층수는 썰물때는 물론 강하게 하향류를 나타내지만 밀물때 들어오는 상대적으로 염분이 높은 물은 염분이 낮은 표층수 아래로 수심이 깊은 곳으로 밀려 들어오고 그래서 표층을 제외한 하층의 상향유속은 강하나 표층유속은 밀려 들어오는 밀물의 영향을 덜 받아서 상향유속이 약하게 나타나는 것으로 설명된다. 그리고 저층에서 썰물때에도 상향류를 나타내는 것은 수심이 갑자기 얕아지는 강의 갈림지점 앞에 있는 이 부근의 깊은 저층에 큰 와류가 있고 관측지점  $N$ 은 저층 와류의 상향류부분에 해당되는 것으로 가정함으로써 설명이 될 수 있다. 그래서 저층수도 혼합과정을 계속하

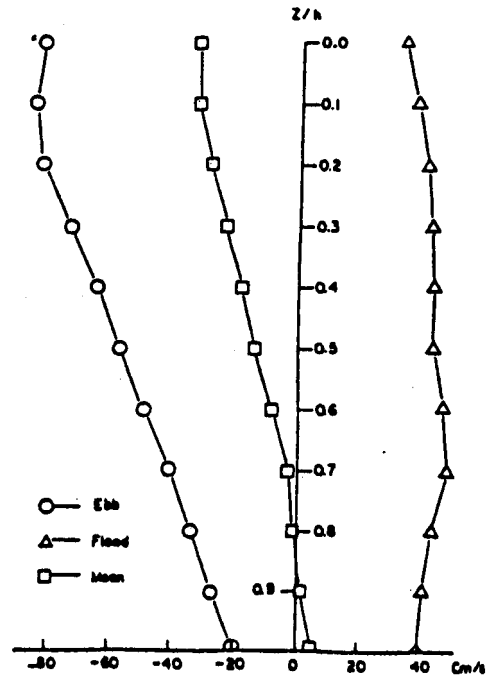


그림 20. C에서의 유속 연직분포(1984. 3. 29)

지만 보다 위층의 물처럼 조석진동을 하면서 이류와 층류에 의한 활발한 혼합을 거치지 않으므로 염분이 상대적으로 높으며 조석주기에 따라 크게 염분값이 달라지지 않는다. 그리고 이 지점의 저층수는 동지류로부터의 流入水에 큰 영향을 받을 것으로 짐작되는데 코리올리효과의 영향으로 밀물때 바다쪽에서 밀려 올라오는 물은 동지류쪽이 중앙지류쪽보다 더 강할 것이므로 이 물이 두 지류가 만나는 곳인  $N$ 부근에서의 저층수를 형성하는 주류가 될 것이라 생각된다.

강이 중앙지류와 동지류로 갈라지는 부분에서 강의 흐름은 동쪽으로 굽어 흘러서  $A$ 쪽으로 더 강한 유속이 관측되는데 이 때문에 강이 갈라진 후 중앙지류의 서쪽부분은 흐름이 정체류적인 성질을 약하게 나타낸다. 그래서 이 부근의 강 중심부에 강축을 따라 모래의 퇴적이 이루어져 저조때에는 물위에 드러나는 긴 사구가 형성되어 있으며 이 사구의 좌우에서 흐름의 특성이 달라지게 된다.  $A$ 는 중앙사구의 동쪽에 있고 밀물때의 상향류와 썰물때의 하향류가 모두 강하며 평균류는 얇은 표층류를 제외하고는 모두 상향류를 나타낸다(그림 18).  $A'$ 는 사구의 서쪽에 있고 밀물때나 썰물때의 상하향류는 모두 약하며 평균류는 전층에서 약하게 하향류를 나타낸다(그림 19). 그리고 앞서 언급한대로  $A'$ 에서 평균적으로 비교적 높은 염분을 나타내며 상류나 하류의 관측점보다는 특이하게 잘 혼합된 상태를 보여준다. 썰물때  $A$ 쪽(중앙사구 동쪽) 흐름이 강한 것은 강이 이 근방에서 동쪽으로 굽어서 흐르기 때문이라고 설명되는 반면 밀물때에도 이쪽 흐름이 강한 것은 코리올리(Coriolis) 효과 때문으로 해석된다(그림 1). 이런 이유로  $A$ 쪽은  $A'$ 쪽(중앙사구의 서쪽) 흐름보다 성층이 더 되어있고 순환변수도 크다(그림 18). 그리고  $A'$ 쪽은 어느정도 정체류적인 성격을 가지므로 잘 혼합되어 있고 순환변수도 작게 나타난다(그림 19).

유속의 시간변화를 살펴보면(그림 21, 22, 23, 24, 25) 대체로 저조후 2시간 반 정도 후에 전류가 일어나고 고조후 2시간 정도 후에 전류가 일어나는데 이것은 이곳 낙동강 하류에서 조석파가 정상파적인 특색보다는 진행파적인 특색이 강함을 뜻하는데 그 이유는 관측구역이 하류보다 상류쪽이 더 깊어져 하상에 의한 조석파의 반사가 크지 못함에 기인하는 것으로 설명된다. 이것은 전년도 11월 관측시에 D를 제외하고 B와 C에서는 진행파적인 특성을 나타낸다는 결론을 얻은 것과 동일하다(금년 3월에는 D에서 관측하지 않았음). 그리고 밀물때에는 층간의 유속차가 크지 않는데 비해 썰물때에는 그것이 크며 따라서 층간의 유속차에 의한 혼합(shear mixing)이 썰물기간 중에 크게 일어날 것으로 기대된다.

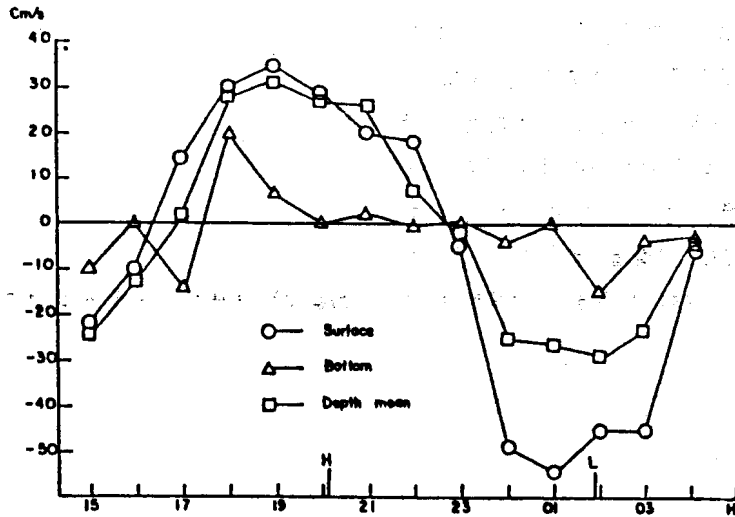


그림 21. P에서의 유속 시간 변화(1984. 3. 30)

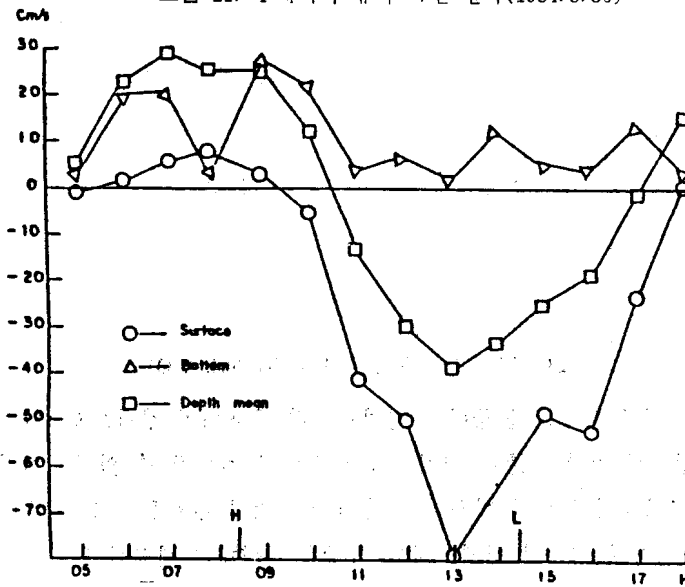


그림 22. N에서의 유속 시간 변화(1984. 3. 31)

#### 4. 혼합 특성

앞에서 구한 성층변수와 순환변수에 의해 Hansen-Rattray의 분류법<sup>5)</sup>으로 관측점들의 estuary 분류를 해보면 그림 26과 같이 A'와 A점은 1b형에 속하여 비교적 잘 혼합된 편이고 C, P 및 N점은 2b형에 속하여 일정 깊이에서 역류가 있는 부분적으로 혼합된 estuary에 해당되고 이류와 확산양자에 의해 상류쪽에서의 염분수송이 일어나고 있음을 알 수 있다. 염분의 시간변화(그림 8, 9, 10, 11, 12)를 살펴보면 썰물이 밀물로 전류되는 시간 전후에서는 상하층의 염분차가 작는데 반대의 전류 시간 전후에는 상하층의 염분차가 크다는 것을 알 수 있다(N점은 제외). 이것은 대체로 밀물기간에는 이류에 의하여 염분이 상류로 운반되면서 점

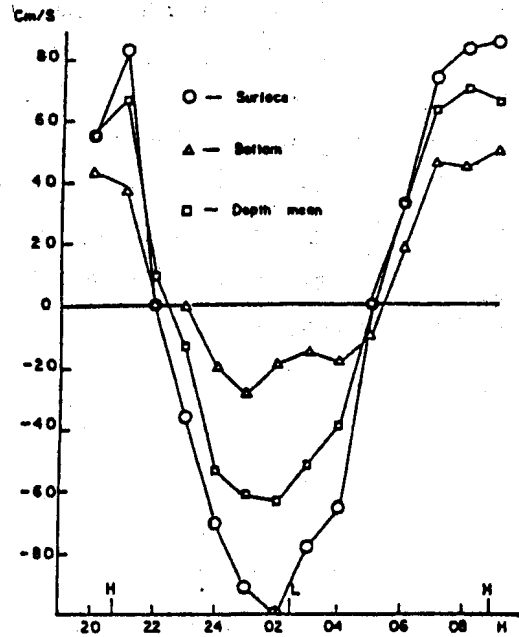


그림 23. A에서의 유속 시간 변화(1984. 3. 31)

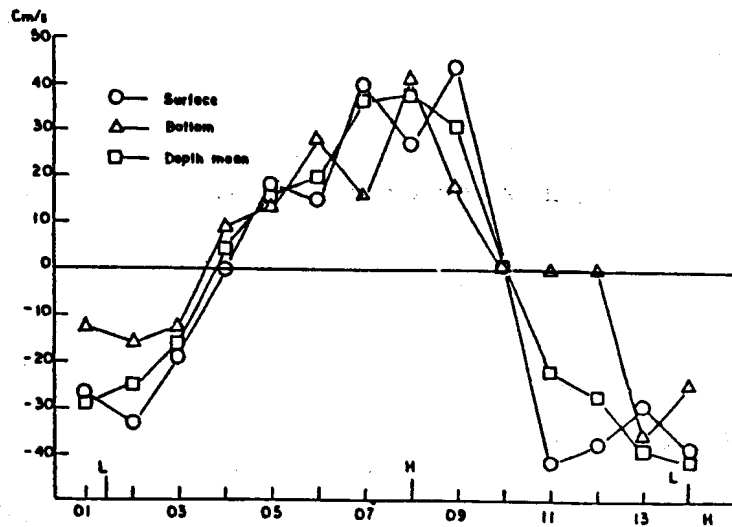


그림 24. A'에서의 유속 시간 변화(1984. 3. 30)

점 성층이 강화되어가고 반면 썰물기간 중에는 상하층간의 유속차가 심하므로 shear에 의한 entrainment 혼합이 강하게 일어나 점점 성층이 약화되기 때문이라 설명할 수 있다. 그리고 N에서 저층 염분변화가 다른 층의 조석주기에 따른 변화와 달리 비정상적인 변화를 하는 이유는 앞에 말한대로 이 부근의 저층수가 큰 와류를 이루며 정체류적인 특성을 나타내기 때문이다.

낙동하구에서의 혼합특성을 좀 더 자세히 살펴보기 위해서 그림 13과 14를 다시 음미해 보자.

그림 13을 보면 전연 혼합이 안된 바닷물의 썩기  
 가 C를 지나 A에까지 이르고 있음을 알 수 있고  
 A에서 N사이에서도 염분 연직 기울기가 큰 저층  
 수와 비교적 잘 혼합된 상층수의 분포를 볼 수 있  
 고 N보다 상류의 물은 비교적 잘 혼합되었음을 볼  
 수 있다. 이와같은 염분 연직 분포에 대응해서 P  
 에서 N까지는 표면 염분 기울기가 완만하지만 N  
 에서 A, A에서 C로 가면서 점점 표면 염분 기울  
 기가 커지는 것을 볼 수 있다. 따라서 N에서 A,  
 혹은 C 사이에서 연직 혼합과 수평혼합이 활발하  
 게 일어남을 짐작할 수 있다. 그림 13과 같은 염  
 분분포는 썩물이 강해지면서 점점 P와 N 사이에  
 서 보이는 저염분이며 잘 섞인 물의 분포가 하류쪽

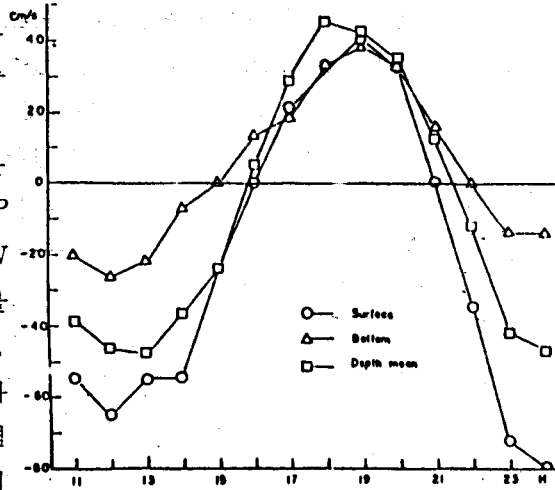


그림 25. C에서의 유속 시간 변화(1984. 3. 29)

으로 밀려 내려가고, 동시에 빠른 상층수와 느린 하층수 사이에 층류 때문에 entrainment에 의한 연  
 직혼합이 활발해져서 염분의 연직기울기는 더욱 감소되어 성층이 약화된 더 잘 혼합된 물이되어 하  
 류로 흘러서 강략 낙동포로 흘러나갈 것이다. 그리하여 썩물이 밀물로 전류되는 때에는(그림 14) 대  
 체로 잘 혼합된 물의 분포가 C에까지(작년도 11월 관측결과에 의하면 D까지도)<sup>6)</sup> 분포하게 된다(그  
 리고 금년도 제 3차 관측때는 E 이하에서도 완전히 혼합된 물을 관측할 수 있었다. D에서는 표층  
 염분은 15ppt 이고 저층염분이 23.5 ppt 정도인데 E와 F에서는 전층이 거의 18 ppt로 균일하였고 G  
 에서는 전층이 24 ppt로 균일하였다). 이상의 자료에서 이류에 의한 상류로의 염분수송은 밀물때  
 주로 일어나지만 이 밀물 기간에는 상하유속차가 작고 성층이 크므로 상층으로의 염분혼합은 확산

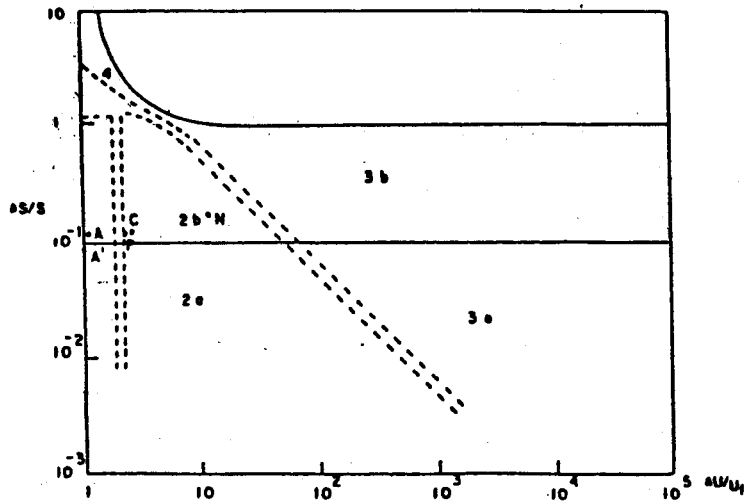


그림 26. Estuary 분류도

에 의해 이루어지며 이 과정이 활발한 곳은  $N$ 이하의 하류이며 특히  $A$ 에서의 수심이 깊어지는 부분에서 염분기울기가 큰 저층수가 수심 깊은 곳으로 퍼져들어가면서 turbulence가 커지므로 급격한 연직혼합이 이루어지는 것으로 보인다. 썰물기간중에는 상하유속차가 크므로 entrainment에 의한 혼합이 활발해져서 성층은 점점 약해지며 이와 같은 경향은 상류로부터의 물덩어리가 하류로 흘러 내려가면서 시간이 경과함에 따라 진행되어서 제 3차 관측의 각 점에서 보는 것처럼  $E$ 에 이르러서는 잘 혼합된 물이 되어 강 밖으로 흘러 나가게 된다. 그리고 그림 14에서 나타나는 또 하나의 특징은  $N$ 의 저층에 잘 혼합된 상층과는 달리 상대적으로 염분이 높은 물덩어리가 있음을 볼 수 있는데 앞에서의 염분특성 부분에서 논한 바 있는 이 부근 저층수의 특성을 나타내는 또 하나의 일면이라 할 수 있다.

이상은 제 1차 관측결과를 설명한 것인바 제 3차 관측결과는 동지류가 막히고 하상변화가 일어났으므로 또 다른 양상이 나타나고 있다. 즉, 수심이 깊은 곳이  $B$ 까지 연장되어 이곳의 저층에 두꺼운 고염분층이 형성되어 있는 점이 제 1차 관측때와는 다르다. 제 3차 관측은 주로 썰물때의 표층수의 운동과 혼합과정에 관심을 둔 것이었기 때문에 다시 한번 정점관측을 실시한 후에 변화된 양상을 논의함이 타당할 것이다.

제 1차 관측결과에서 연직 확산 계수를 다음 식<sup>7)</sup>

$$K_z = \frac{\int \bar{u} \frac{\partial s}{\partial x} \cdot dz}{\frac{\partial s}{\partial z}} \quad (1)$$

에 의해서 근사적으로 구해보면  $P$ 에서  $N$ 사이에서  $37.7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $N$ 에서  $A$ 사이에서  $634.1 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $A$ 에서  $C$ 사이에서  $36.1 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 이다. 이 결과는 앞에서 언급한 바와 같이  $N$ 와  $A$ 사이에서 연직확산이 클 것이라는 짐작과 일치한다.

강측을 따른 수평 확산계수를 다음 식<sup>8)</sup>

$$K_x = -F_d / \frac{\partial \langle s \rangle_{yzIT}}{\partial x} \quad (2)$$

$$[\text{단, } F_d = \langle sv \rangle_{yzIT} - \langle s \rangle_{yzIT} \langle v \rangle_{yzIT}]$$

에서 구하여 보면  $P$ 와  $A$ 사이에서  $1.9 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $N$ 과  $C$ 사이에서  $1.0 \times 10^8 \text{ cm}^2/\text{sec}$  등이다. 이 결과도 상류에서보다  $N$ 이하의 하류에서 혼합작용이 클 것이라는 앞에서의 논의와 잘 일치한다.

제 3차 관측결과에서 수평 확산계수는 다음 식<sup>9)</sup>에서 근사적으로 구하면

$$\frac{ds}{dt} = K_x \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} \quad (3)$$

$N$ 에서  $B$ 사이에서  $6.8 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $C$ 와  $E$ 사이에서  $3.3 \times 10^8 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 이다. 이 결과는 앞에서 구한 확산계수보다 대체로 큰 값을 나타내고 있는데 앞의 값들은 전층 평균으로 구한 것이고 수평 확산만이 포함되어 있는데 비해 후자들은 식 (3)에서 횡단면 확산과 연직 확산이 실제로는 존재하나 무시하였기 때문에  $K_x$  값이 크게 계산된 것으로 해석된다. Rhodamine 염료실험에 의하여 계산된 확산계수는  $N$ 에서  $608 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $A$ 에서  $2276 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $B$ 에서  $2028 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $C$ 에서  $909 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,

D에서  $767 \text{ cm}^2/\text{sec}$ , E에서  $300 \text{ cm}^2/\text{sec}$ , F에서  $2733 \text{ cm}^2/\text{sec}$ , G에서  $2950 \text{ cm}^2/\text{sec}$  등이다. 이 값은 앞에서 구한 값들과 큰 차이를 보이는데 이것은 표면확산만을 계산한 점과 짧은시간 관측에 의한 계산이기 때문에 여러가지 다른 요인에 의한 혼합효과는 나타나지 않고 분자 확산 효과만이 주로 나타났기 때문으로 해석할 수 있다.

제 1차 관측시 한 조석주기 동안(12.4시간)의 유량을 다음 식<sup>10)</sup>으로 근사적으로 구하면

$$R = \bar{A}\bar{u} - \frac{1}{2}A_0U_0 \quad (\text{진행파일 경우}) \quad (4)$$

C에서의 유량은  $2.06 \times 10^7 \text{ m}^3$ 이다. 조석 프리즘 체적을 다음 식으로 근사적으로 계산하면

$$P = \int_0^{\frac{\lambda}{2}} A \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \cdot dx = \frac{A\lambda}{\pi} \quad (5)$$

C에서는  $1.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 이었다.

### 5. 홍수시의 특성

집중호우가 있는 다음 1일 및 2일 후에 A, C 및 D점에서 관측한 결과, 염분은 거의 관측이 안 되었고 전조석주기동안 전층에서 하향류의 흐름만이 관측되었는데 그래도 이 하향류의 강약은 조석 주기에 따라 주기적으로 변하며 그 위상이 조석의 위상과 일치함을 그림 27, 28, 29에서 확인할 수 있다. 이때의 유량은 A에서는  $1.91 \times 10^8 \text{ m}^3$ , C에서는  $5.35 \times 10^7 \text{ m}^3$  및 D에서는  $4.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ 의 값이 구해졌다.

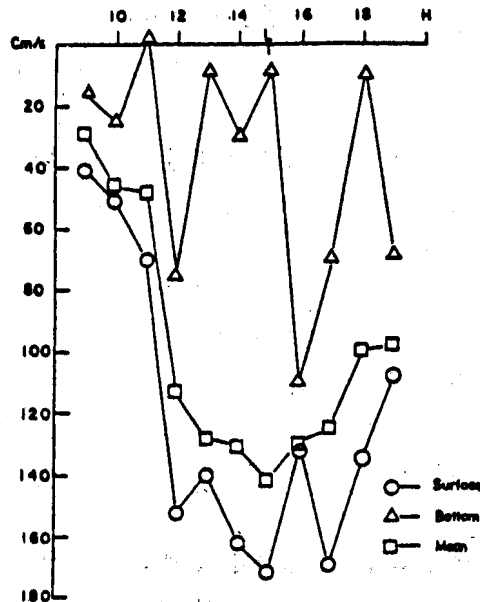


그림 27. A에서의 홍수기의 유속 시간 변화 (1984. 8. 27)

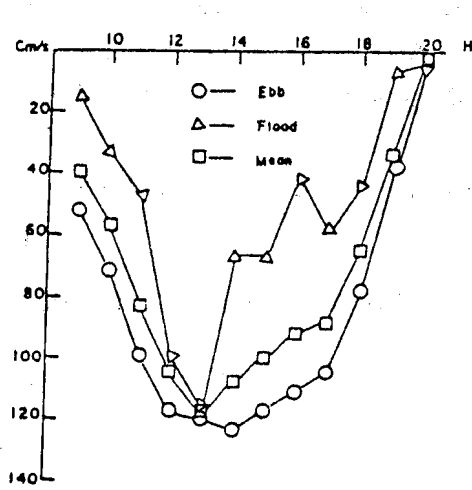


그림 28. C에서의 홍수기의 유속 시간 변화 (1984. 8. 27)

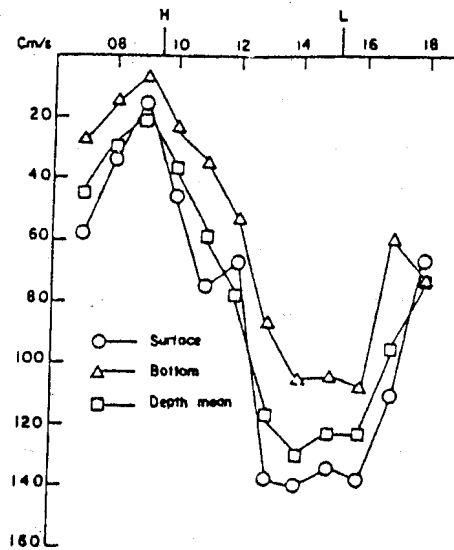


그림 29. D에서의 홍수기의 유속 시간 변화 (1984. 8. 28)

## 6. 결 론

금년도 관측결과에서 얻은 결론은 전년도 관측결과를 정리한 저자 등의 논문<sup>11)</sup>과 일치하는 바가 많으므로 중복되는 부분은 생략하고 새로 얻은 결론들을 정리하면 다음과 같다.

- 가. 강의 수로내에서의 조석파는 진행파적인 특색이 강하다.
- 나. 밀물시의 고염분 썩기는 동지류와 중앙지류의 분지점보다 상류의 수심이 깊은 부분에까지 이른다.
- 다. 이 분지점 부근 이하의 하류에서 주로 혼합 및 확산과정이 일어난다.
- 라. 밀물 기간에는 이류에 의한 염분의 상류향수송이 일어남에 따라 성층이 강화되고 따라서 확산에 의한 염분연직 혼합이 강하다.
- 마. 썰물 기간에는 층간 유속차에 의한 entrainment 혼합이 강화되어 하류로 갈수록 성층이 약화되어서 잘 혼합된 물이 되어 강 밖으로 흘러 나간다.
- 바. 동지류가 막힌 후에 하상의 변화가 있어 수심이 깊은 영역은 하구둑 건설예정지점 까지로 확대되었고 이 수심 깊은곳의 저층에는 상당한 고염분의 물이 정체되어 있음이 관측되었다. 동지류가 막힌 후의 확산 및 혼합영역의 변화를 살피기 위해서는 앞으로 관측이 더 필요할 것으로 생각된다.
- 사. 홍수때에는 전 조석주기 동안 하류향 흐름만이 존재하나 그 강약은 조석주기와 동일 위상으로 주기적으로 변하며 염분은 대마등 앞에서도 거의 관측되지 않았다.



### 참 고 문 헌

- 1) 유흥선의 3명 : 낙동강 하구의 해양학적 특성연구, 한국해양대학 해사기초과학연구소, 논문집 제 1집, 3, 1984, p. 2.
- 2) 유흥선의 3명 : *ibid.* p. 3.
- 3) 유흥선의 3명 : *ibid.* p. 4.
- 4) 유흥선의 3명 : *ibid.* p. 4.
- 5) Hansen, D. V., and Rattray, Jr. M. : New dimensions in estuary classification, *Limnology and Oceanography*, 11, 1966, pp. 319~326.
- 6) 유흥선의 3명 : *ibid.* p. 3.
- 7) Officer, C. B. : *Physical Oceanography of Estuaries*, 1976, p. 192.
- 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) Hugo, B. F. 외 3명 : *Mixing in Inland and Coastal Waters*, 1979, pp. 65~71.
- 10) Dyer, K. R., *Estuaries : A Physical Introduction*, 1973, pp. 29~30.
- 11) 유흥선의 3명 : *ibid.* p. 9.

1. 凡在本行开立存款账户的客户均可办理。

### 提 取 办 法

1. 凡在本行开立存款账户的客户均可办理。

凡在本行开立存款账户的客户均可办理。提取办法如下：(一) 活期存款随时提取。(二) 定期存款按约定日期提取。(三) 零存整取存款按约定日期提取。(四) 存本付息存款按约定日期提取。以上各项存款提取时，客户需持有效身份证件及存款凭证，前往本行柜台办理。本行将竭诚为您服务。