

沿岸海域에서의 混合過程

조 흥 연 (한국해양연구소 연안·항만공학연구센터 선임연구원)

1. 서 론

연안(沿岸; coastal zone)은 육지 및 해상오염원의 영향을 직접 받을 것으로 예상되는 해역으로, 해안선이 복잡하고 불규칙적인 서·남해안은 육지주변에 위치한 주요 섬과 섬을 연결한 안쪽 해역, 해안선이 단조롭고 비교적 규칙적인 동해안(제주도 포함)은 해안선으로부터 3해리 이내의 해역을 연안에 포함한다(환경부, 1995; 해양수산부, 1997). 또한, 연안은 폐쇄성 정도에 따라 연안 또는 내만(內灣)으로 구분된다.

본 논고에서는 대부분의 담수 또는 오염물질이 하천을 통하여 유입되기 때문에, 하천과 하구 또는 내만(inner bay)에서의 혼합과정으로 제한하여 기술하였다. 특히, 담수와 해수의 혼합을 중심으로 기술하고, 오염물질의 혼합과정에 대해서는 약술하였다.

2. 혼합에 영향을 미치는 인자

혼합(mixing)은 한 수체가 다른 수체와 섞이거나 희석되는 과정(분산 및 확산)을 포함하는 포괄적인 용어이다(Fischer, 1979). 연안해역의 혼합은 작은 규모의 난류확산(turbulent diffusion)과 평균유속장의 공간적인 변화의 조합에 의하여 진행된다. 하구를 포함한 연안해역은 담수와 해수의 혼합강도에 따라 강성층화(fjord and saline wedge; highly stratified), 부분성층화(partially stratified), 완전혼합(well mixed) 상태로 구분할 수 있다. 지형에 따른 분류, Hansen & Rattray(1966) 분류방법 등이 있으나, 유체의 동력학적인 특성에 따른 분류가 혼합현상을

기술하는데 적합할 것으로 사료된다. 우리 나라의 경우, 한강은 신곡수중보와 잠실수중보가 설치되어 있고, 낙동강, 금강, 영산강은 하구둑이 설치되어 자연적인 담수와 해수의 혼합을 저해하고 있다. 또한, 하천 유출량이 계절적인 변동이 크기 때문에 강우시와 비강우시의 혼합상태가 상이하어, 어떤 지역이 항상 어떤 혼합상태를 유지하고 있다고 단정할 수 없다. 하구 및 내만의 혼합양상은 혼합에 영향을 미치는 인자의 시기적·공간적인 변동성에 기인한다. 따라서, 혼합과정에 영향을 미치는 인자, 즉 바람, 조석, 하천의 유량에 대하여 상술하고자 한다.

2.1 바람에 의한 영향

바람은 큰 호수나 해양에서는 중요한 에너지원으로 작용하고 있으나, 하구에서는 중요한 역할을 할 경우도 있으나 그렇지 않은 경우도 있다. 즉, 조석 및 하천 유량과의 상대적인 영향정도에 따라 달라질 수 있다. 시기적으로는, 하계의 태풍 또는 동계의 북서계절풍의 영향이 중요할 수 있다. 바람은 수표면에 항력(drag force)을 발생하여 바람이 부는 방향으로 수표면을 이동시키기 때문에 부유물체 또는 기름띠, 온수(warm water) 및 담수층, 적조 등 표층에 위치하고 있는 물질의 이동에 미치는 영향은 매우 크다. 그러나, 바람에 의한 영향이 직접적으로 혼합에 영향을 미치는 것이 아니라, 바람에 의하여 발생하는 파랑과 순환흐름(wind-driven circulation flow)에 의하여 연직혼합 및 평면혼합이 진행되기 때문에 바람에 의한 흐름의 영향을 고려하는 과정이 혼합과정 분석에 포함되어야 한다. 또한, 수심이 얇은 해역에서는 바람

과 풍파(wind wave)가 수체의 혼합에 미치는 영향이 매우 크게 나타날 수 있다.

2.2 조석에 의한 영향

조석은 계절적인 변동성이 바람 및 하천유량에 비하여 매우 작으며, 주기적이고 지속적인 특성을 가지고 있다. 조석에 의한 혼합은 흐름의 왕복특성으로 하천의 혼합과 구별된다. 지형적인 특성에 따라 창조우세, 낙조우세, 또는 평균 흐름양상에 따라 혼합양상이 다양해진다. 조석에 의한 영향은 지형적인 영향과 밀접한 관련이 있으며, 조석의 왕복흐름특성에 의한 Tidal Pumping (net flow, residual current; 창조 또는 낙조우세흐름), Tidal Trapping(조석이동지역에 발생한 분기하천 및 소규모 내만·만곡부에 오염물질이 체류) 현상도 중요하다. 특히, 섬이 많고, 주 흐름영역에 만곡부가 많이 발달된 지형(dead zone, stagancy region)에서는 담수 및 오염물질의 체류현상이 발생한다. 일반적으로, 조석의 영향이 우세한 영역에서는 완전혼합상태가 유지되고, 하천유출량의 영향이 우세한 해역에서는 강성층 또는 부분성층화상태가 유지된다.

2.3 하천에 의한 영향

하천에 의한 영향도 하천을 통하여 유출되는 담수의 양과 조석 유·출입량 또는 조석의 영향이 없는 영역에서는 수용수체(receiving water)의 체적비율에 따라 혼합범위(공간적인 규모) 및 지속시간이 결정된다. 대하천의 경우, 유지유량이 풍부한 경우에는 담수와 해수와 혼합이 광범위한 영역에서 지속적으로 이루어 질 수 있으나, 대부분의 연안내만에서는 소하천에서 일시적으로 유출되는 담수의 영향이 단기간에 국지적으로 발생한다. 필자가 마산만으로 유입되는 하천(창원천, 남천: 평상시 유출량 2~3 CMS)의 합류구 부근과 톨섬(마산만 중앙부)부근에서 관측한 1

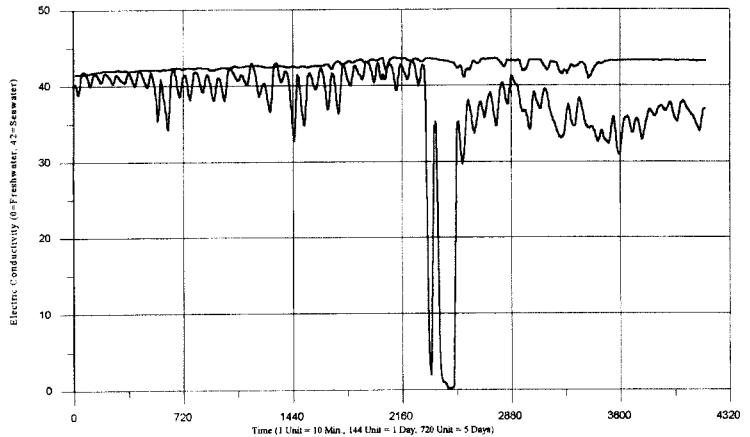


Fig. 1 Electric Conductivity(Salinity) Change in Masan Bay (Estuary and Bay Center)

달동안의 전기전도도(0=담수, 40=해수) 변화이다(그림 1). 전기전도도가 1998년 6월 24~26일경

하천유역(유역면적 : 200km²)에 192mm 강우가 집중된 시기에 크게 감소하고 있음을 알 수 있으며, 이후에도 조석에 따른 일변화 양상을 보이고 있다. 반면, 톨섬 부근의 전기전도도는 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

3. 혼합양상

해수와 담수의 혼합에 영향을 미치는 인자를 바람, 조석, 하천의 유량 등으로 구분하여 기술하였다. 그러나, 혼합양상은 바람, 조석, 하천 유량 등을 외력(external forces) 또는 경계조건으로 하여 하구 및 내만의 흐름양상을 파악하는 것이 선행되어야 한다. 물론, 혼합양상에 따라 파악하고자 하는 흐름양상이 다양하게 된다. 즉, 혼합양상을 예측하는 방법은 모형의 특성(time & spatial scale, dominant forces)과 밀접한 관련이 있다(표 1 참조). 따라서, 혼합양상은 공간적인 측면에서 평면혼합(horizontal mixing), 연직혼합(vertical mixing)으로 구분할 수 있으며, 시간적인 측면에서는 단기혼합(short-term mixing), 장기혼합(long-term mixing)으로 구분할 수 있다.

3.1 공간적 측면의 혼합양상

(1) 평면혼합

평면혼합은 흐름방향의 혼합(longitudinal dispersion)과 흐름방향에 직각인 방향(흐름종단방향)의 혼합(transverse mixing)으로 세분된다. 혼합이 진행되는 속도는 확산계수에 의하여 표현할 수 있다. 하천에서의 확산계수는 수심, 마찰유속 등의 함수로 표현되며, Seo & Jeong(1998)은 하천의 폭을 포함한 보다 개선된 식을 제안하였다. 일반적으로, 흐름방향의 확산은 전단류(shear flow)에 의한 혼합으로 난류확산에 의한 흐름종단방향의 확산보다 혼합이 활발하다. 하천에서의 해석적인 분석(Elder's analysis)에 의하면, 무차원 연직확산계수(Eq. (i))는 연직확산의 경우 0.067, 흐름종단방향 확산의 경우 0.15, 흐름방향의 경우 5.93이다.

$$\frac{\epsilon}{d u_*^3} \quad (\epsilon: \text{연직확산계수}, d: \text{수심}, u_*^2 = \frac{\tau_b}{\rho}, \tau_b: \text{바닥마찰 응력}, \rho: \text{밀도}) \quad (i)$$

하천에서의 결과를 원용하여 하천형 호소, 하구 및 내만의 평면 확산양상도 유사한 기법으로 예측한다. 하천에서는 흐름 및 흐름종단방향에 대한 확산계수에 대한 관측이 수행되었으나, 연안에서는 주 흐름방향이 일정하지 않은 경우도 있고, 측정영역이 매우 넓기 때문에 확산계수의 관측이 매우 곤란한 실정이다. 주 흐름방향이 명확한 하구 및 연안에서는 흐름방향의 확산효과가 흐름종단방향의 확산에 비하여 보다 중요하다. 그러나, 정체수역(하천의 유입이 없는 폐쇄성이 강한 내만)에서는 난류확산에 의한 영향이 지배적이므로 확산이 매우 서서히 진행된다. 즉, 유입된 담수 및 오염물질이 혼합 또는 희석되는 속도가 작기 때문에 국지적으로 오염이 심화될 수 있다.

(2) 연직혼합

연직혼합은 바닥전단응력에 의한 난류확산에 의한 영향, 밀도에 의한 영향(밀도차에 의한 부력의 영향) 등으로 구별할 수 있다. 밀도가 일정하고 조석의 영향이 큰 해역에서는 바닥의 마찰에 의한 영향이 연직혼

Table 1. Types of Transport Models in Estuary and Coastal Waters(Fischer et al., 1979)

Code	Name	Description
1A	One - dimensional tidally averaged	A numerical solution of the one - dimensional tidally averaged dispersion equation*. May be steady state, meaning that the coefficients are constant in time, or the dispersion coefficient and flow parameters may vary between tidal cycles.
1T	One - dimensional tidally varying	A numerical solution of the one - dimensional tidally varying dispersion equation#, in which the tidal elevation, velocity, and dispersion coefficient vary during the tidal cycle.
1TB	Branching one - dimensional tidally varying	A network of 1T models connected at junctions.
2VA 2HA	Two - dimensional tidally averaged	A numerical solution of a two - dimensional tidally averaged dispersion equation. V means a model which uses a vertical (x,z) plane and H means a model which uses a horizontal (x,y) plane.
2VT 2HT	Two - dimensional tidally varying	Similar to 2VA and 2HA except that the tidal elevation and flow velocity vary during the tidal cycle.
3A 3T	Three - dimensional	Three - dimensional tidally averaged(A) and tidally varying(T) numerical models.
P	Physical	A small - scale physical replica of the prototype geometry with provisions for generating tidal and river flows.
NP	Hybrid numerical physical	A combination of a physical and a numerical model, using one model to generate input information for the other.

Description : (*) $A \frac{\partial c}{\partial t} + Q \frac{\partial}{\partial x} (KA \frac{\partial c}{\partial x}) + SS$, (#) $\frac{\partial (AC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uAC) = \frac{\partial}{\partial x} (KA \frac{\partial c}{\partial x}) + SS$

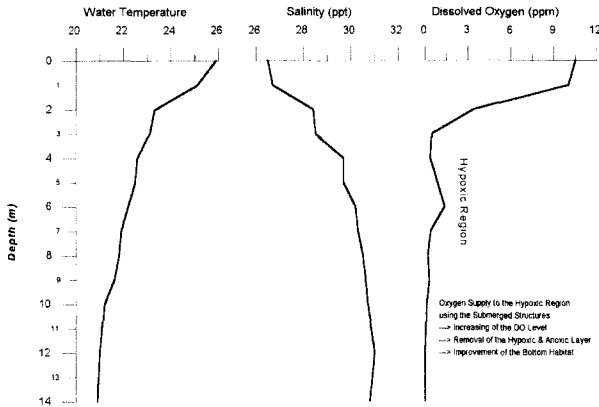


Fig 2. Vertical Distribution of the Water Temperature, Salinity, and DO in Masan Bay

함을 결정한다. 조석이 활발한 해역에서는 연직혼합이 활발하여 완전혼합상태를 유지하는 경우가 많다. 그러나, 조석의 흐름이 약한 정체수역(외해와의 해수 교환율이 저조) 또는 내만에서는 하계에 기온상승 또는 하천을 통한 담수유입으로 인하여 온도 및 염도성층화 현상이 계절적으로 반복되고 있다. 또한, 온도, 염도 성층화로 인하여 연직방향으로의 물질이동이 저해되어 DO 또는 오염물질농도가 성층화되는 양상도 보이고 있다(그림 2). 평면혼합과 마찬가지로 연직혼합도 연직확산계수에 의하여 혼합속도를 파악할 수 있다. 연직확산계수에 대한 식은 많이 제안되어 있으나, 일반적으로 연직방향으로 수체의 밀도차이가 존재하는 성층화 지역에서는 Richard No. (Ri, Eq. ii)를 포함한 식이 대부분을 차지하고 있으며, 바람에 의한 연직혼합은 호소에 대하여 제시된 경험식을 사용하는 경우도 있다.

$$Ri = \frac{g}{N^2} \frac{\partial \rho}{\partial z} / \left(\rho \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (g: \text{중력가속도}, \rho: \text{해수의 밀도}, u: \text{유속}, z: \text{연직방향}) \quad (ii)$$

전반적으로, 연안하구 및 내만의 혼합은 확산계수의 연구와 밀접한 관련이 있다. 그러나, 하천 및 호소에 비하여 혼합현상이 복잡한 해역에 대해서는 확산계수에 대한 연구성고가 매우 미흡한 실정이다. 흐름

이 주기적이고 확산영역이 매우 넓기 때문에 확산계수의 관측 및 확산예측모형의 보정·검증을 위한 자료확보도 매우 곤란하다. 인공위성 자료를 이용한 방법도 수행된 적은 있으나, 대부분의 경우 연안 및 내만의 확산연구가 관측자료의 부족으로 인하여 하천 및 호소에서 수행된 연구결과를 원용하여 수행되고 있다.

최근에는 염도저하 및 상승에 의한 양식장 피해, 배수갑문개폐에 따른 담수 및 오염물질의 확산범위와 해양생태계에 미치는 영향(시화호, 천수만, 낙동강 하구연 등) 분석 등이 환경문제로 대두되어 부각되고 있다(조흥연, 1998). 그러나, 평면방향, 연직방향으로 적절하게 확산범위 및 정도를 예측할 수 있는 모형을 구축하기 위한 자료가 매우 부족한 상황이다. 모델의 능력은 모델의 신뢰성을 결정하는 자료의 질에 의존한다.

3.2 시간적 측면의 혼합양상

(1) 단기혼합

단기혼합에 대한 정의는 명확하게 규정되어 있지 않으나, 계절적인 변동 또는 연변화를 장기로 규정할 경우 단기는 조석규모 또는 강우지속규모 정도의 시간으로 간주할 수 있다. 시간규모가 시간단위 또는 일·주단위 정도에 해당되는 확산은 제일 중요한 인자가 흐름양상 파악이다. 어떤 대표적인 흐름이 아니라 관심대상 해역의 혼합특성을 파악하고자 하는 시점의 흐름양상 파악이 중요하다. 단기혼합의 문제는 집중호우시 담수의 확산범위 예측 및 적조발생에 의한 이동·확산경로 예측, 오염물질 유출사고에 의한 이동·확산경로 예측과 관련되어 있다. 따라서, 단기혼합 과정에서는 담수 및 오염물질 유출과정을 신속하게 모의하여야 하므로 장기적으로 지속되는 영향(증발 또는 오염물질의 반응) 등은 일반적으로 배제된 상태에서 예측을 수행될 수 있다. 가장 중요한 인자는 정확한 흐름장(flow field) 예측이다.

(2) 장기혼합

하구 및 내만의 수자원관리 또는 (수질)환경 관리

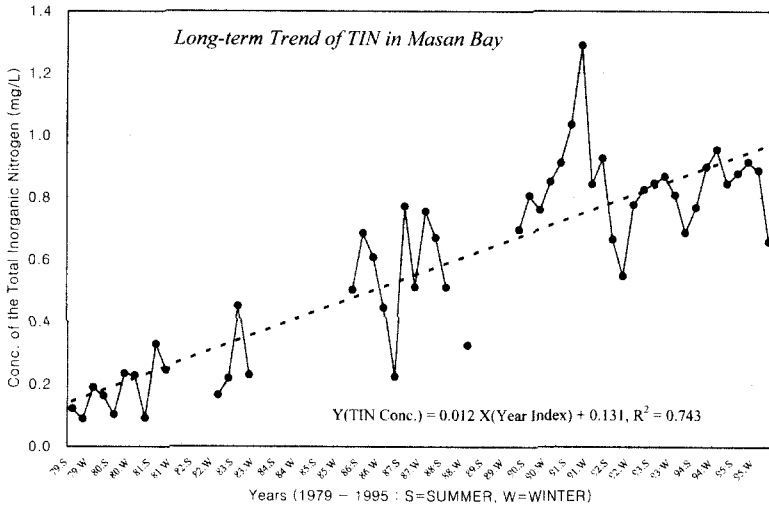


Fig 3. Long-term trend of TIN in Masan Bay

측면에서의 혼합양상은 시간규모가 계절단위 또는 연 단위에 해당한다. 작은 시간규모의 예측을 장기간 수행한다고 해서 장기간의 혼합예측이 되는 것은 아니다. 또, 실질적으로도 작은 시간규모의 모델로 장기적인 혼합양상을 예측하는 방법은 비효율적이다. 장기혼합은 서서히 진행되기 때문에, 하구 또는 내만에서의 질량수지분석(mass balance analysis)에 근거하여 수행되어야 한다. 따라서, 장기간에 걸쳐 평균한 값 또는 대표값을 파악하는 것이 중요하다. 해역의 염도가 장기간에 걸쳐 저하되는 양상 또는 오염이 진행되는 상황 등을 파악하여야 한다(Fig. 3). 또한, 해역 및 내만에 영향을 미치는 유역인자(인구, 상·하수도 배출량, 오염부하량) 등도 파악하여야 한다. 해수와 담수의 혼합은 유역 및 해역에서의 강우량, 증발량, 타수계로부터의 유입량(광역상수도에 의한 용수공급량), 외해 유출량 등을 고려하여 파악할 수 있으며, 오염물질 확산은 대기로부터의 유입량, 하천 및 해양방류구 등을 통틀어 통한 오염부하량, 퇴적층(sediment layer)으로의 침전량 또는 퇴적층으로부터의 용출량, 분해에 의한 소멸량, 이송·확산에 의한 외해로의 유출량 등에 의하여 파악할 수 있다. 대상 해역의 흐름장 파악도 매우 중요하지만, 보다 중요한 인자는 장기간에 걸친 입력자료(input parameter: 질량수지분석에 필요한 자

료)의 정량화이다.

4. 결론 및 토의

우리 나라의 연안하구 및 내만의 혼합특성을 혼합인자, 혼합양상의 관점에서 구분할 수 있다. 특히, 조석의 특성이 명확하게 구분되는 서해안, 남해안, 동해안에 대하여 혼합인자의 영향정도, 혼합양상의 특성 및 규모를 정리하였다.

서해안은 조석에 의하여 지속적으로 평면 및 연직혼

합이 활발하게 진행되며, 하계 태풍 내습시 또는 동계 지속적인 북서계절풍의 영향의 조석의 영향에 추가되어 영향을 미친다. 하천의 유량에 의한 영향은 홍수기에 일시적으로 큰 영향을 미치나, 한강을 제외하고는 해수와의 활발한 혼합적용으로 인하여 신속하게 희석되는 양상을 보인다. 반면, 남해안은 폐쇄성이 강한 내만으로 형성되어 있기 때문에 조석의 영향, 바람의 영향, 하천의 영향이 전반적으로 작은 영역에 해당한다. 일시적인 홍수시의 영향은 서해안과 동일하다. 동해안은 해안선이 단조롭고 외해에 대한 개방성으로 인하여 큰 희석효과를 보이고 있다. 조석의 영향보다는 동해의 해류양상에 의하여 담수 및 오염물질 혼합된다고 할 수 있다. 그러나, 연안하구 및 내만의 혼합은 지역적인 특성이 강하기 때문에 혼합특성을 파악하고자 하는 관점(time & spatial scale)을 명확하게 하여 접근하여야 할 것으로 사료된다.

연안하구 및 내만에서의 혼합과정은 매우 복잡하고, 시간적·공간적인 변화가 심하기 때문에 다양한 특성을 지니고 있다. 연안해역은 생산성이 높고, 연안 유역의 토지이용도는 매우 크기 때문에 과밀양식, 남획 및 연안개발로 인한 환경오염문제가 발생할 소지가 매우 큰 해역이다. 따라서, 과밀양식에 의한 연안 어장의 황폐화, 개발에 의한 연안해역의 오염문제를

해결하기 위해서는 연안에서 발생하는 오염물질 또는 유입되는 오염물질의 거동(advection, diffusion, decay etc.) 및 혼합양상에 대한 연구가 다방면에서

수행되어야 할 것으로 사료된다. 특히, 가용한 양질의 자료를 확보하기 위한 체계적인 관측계획이 수립·추진되어야 할 것으로 사료된다. ●

참고문헌

조흥연, 1998. 연안수질오염의 현황 및 문제점, 토목, 제46권, 제4호, pp39~45.

해양수산부, 1997. 해양수산 통계연보.

환경부, 1995. 해양오염측정망 운영지침.

Aubrey, D.G. and Friedrichs, C.T.(Editors), 1996. Buoyancy Effects on Coastal and Estuarine Dynamics, Coastal and Estuarine Studies 53, American Geophysical Union.

DePinto, J.V., Lick, W., and Paul, J.F., 1994. Transport and Transformation of Contaminants Near the Sediment - Water Interface, Lewis Pub.

Donigian Jr., A.S., and Huber, W.C., 1991. Modeling of Nonpoint Source Water Quality in Urban and Non-urban Areas, EPA/600/3-91/039, US EPA.

Dronkers, J. and van Leussen W., 1988. Physical Processes in Estuaries, Springer - Verlag.

Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H., 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press.

Fischer, H.B.(Editor), 1981. Transport Models for Inland and Coastal Waters, Proceedings of a Symposium on Predictive Ability, Academic Press.

Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H., 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press.

GESAMP, 1991. Coastal Modelling, IMO/FAO/UNESCO/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution, Reports and Studies No.43, International Atomic Energy Agency.

Gameson, A.L.H., 1973. Mathematical and Hydraulic Modelling of Estuarine Pollution, Water Pollution Research, Technical Paper No.13, Proceedings of a Symposium : Water Pollution Research Laboratory.

Hansen, D.V. and Rattray, M., 1966. New dimensions in estuary classification, Limnology and Oceanography, Vol.11, pp.319-325.

Heaps, N.S.(Editor), 1987. Three - Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal and Estuarine Sciences 4, American Geophysical Union.

Horikawa, K., 1988. Nearshore Dynamics and Coastal Processes, Theory, Measurement, and predictive Models, University of Tokyo Press.

IAHR, 1991. Hydraulics and the Environment : Partnership in Sustainable Development, J. of Hydraulic Research, Vol.29, Extra Issue.

Lam, D.C., Murthy, C.R., and Simpson, R.B., 1984. Effluent Transport and Diffusion Models for the Coastal Zone, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies 5, Springer - Verlag.

Nemerow, N.L., 1991. Stream, Lake, Estuary, and Ocean Pollution, Environmental Engineering Series, Van Nostrand Reinhold

Pattiaratchi, C.(Editor.), 1996. Mixing in Estuaries and Coastal Seas, Coastal and Estuarine Studies 50, American Geophysical Union.

Prandle, D.(Editor), 1992. Dynamics and Exchanges in Estuaries and the Coastal Zone, Coastal and Estuarine Studies 40, American Geophysical Union.

Seo, I.W. and Cheong, T.S.(1998). Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams, J. of Hydraulic Engineering, Vol.124, No.1, pp.25-32.

Smith, D.E., Leffler, M., and Mackiernan, G., 1996. Oxygen Dynamics in the Chesapeake Bay : A Synthesis of Recent Research, Maryland Sea Grant College.

Thomann, R.V. and Muleer, J.A., 1987. Principles of Surface Water Quality Modeling and Control, Harper Collins.

Wood, I.R., Bell, R.G., and Wilkinson, D.L., 1993. Ocean Disposal of Wastewater, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol.8, World Scientific.

Fig. 1 Electric Conductivity(Salinity) Change in Masan Bay(Estuary and Bay Center)

Fig. 2. Vertical Distribution of the Water Temperature, Salinity, and DO in Masan Bay