

## 境界層 흐름 特性

張 元 一\*

### Characteristics of the Boundary Layer Flow

Won-Yil Jang\*

#### Abstact

Sediment transport develops from saltation to suspension gradually with increasing transport stage. The concentration of sediment transport and the velocity of movement are fuctions of the excess shear stress.

Since sediment transport is very difficult to measure and the background theory of the correlations between the parameters in sediment transport is not fully understood, and experimental methods of the effects of individual parameter are undertaken.

Interpretation of flow near the bed related to sediment transport may be complicated futher by interactions between the sediment and the flow, but the boundary layer near the bed is important to coastal engineers and the field of the sediment transport. And bottom boundary layer processes influence flow and sediment.

This paper, aims to describe the characteristics of the boundary layer flow from the dimensionless particle parameter, particle mobility parameter and critical bed shear velocity.

#### 1. 서 론

퇴적물 이동에 관한 이론 분야는 퇴적물의 이동에 영향을 미치는 요인에 대한 개개의 효과만이 이해되어 있는 상태이고 그 요인들의 상호 연관성을 정확히 규명하지 못한 관계로 대부

---

\* 한국해양대학교 교양과정부 부교수(물리학 전공)

분 경험 및 실험적인 접근에 의한 방법이 적용되고 있다. 흐름의 조건, 입자의 조건, 바닥의 상태, 마찰효과 등 퇴적물 이동에 영향을 미치는 요인의 상호 연관성 및 경계층에 관한 해석은 상당히 복잡한 문제로 인식되어 있다. 본 논문에서는 퇴적물 이동의 모델화를 위한 기초작업으로 수학적 방법들을 통하여 유수의 조건을 중심으로 한 특성을 고찰하고자 하였다.

level Z에서의 유속 U에 관한 아래식은 층류, 난류등 흐름의 형태에 관계없이 가장 일반적으로 적용되는 유속에 관한 분포식이나, 경계층에 대한 적용 및 입자의 이동에 적용하기에는 흐름 및 입자의 제조건이 고려되어야 한다.

$$U = (U_* / k) \ln(Z / Z_0)$$

U<sub>\*</sub> : friction velocity                      k : karman' constant

Z<sub>0</sub> : roughness height

Soulsby & Dyer(1981)는 상기의 유속 분포식에서 가속, 감속 흐름에 대한 Z<sub>0</sub>, U<sub>\*</sub>의 오차에 관한 내용을 추가하여 아래의 (1)식을 제안하였고, (1)식은 가속, 감속효과가 U<sub>\*</sub>, Z<sub>0</sub>에 미치는 영향으로, 가속흐름에서 두 인자가 과소평가, 감속흐름에서는 과대평가 됨을 나타낸 식이다.

$$U = \frac{U_*}{k} \left( \ln \frac{Z}{Z_0} - \frac{(Z-Z_0)}{\gamma \lambda} \right) \dots\dots\dots(1)$$

γ : constant                                      λ : acceleration length scale

경계층 및 입자의 이동에 대한 문제는 입자와 흐름의 상호작용으로 인하여 상당히 복잡하게 된다. Smith(1977)는 유속분포에 관한 상기식에서 sand grain의 이동층에 대해 roughness height Z<sub>0</sub>를 excess shear stress(τ-τ<sub>0</sub>)와 flat bed roughness(Z<sub>n</sub>), sand grain density(ρ<sub>s</sub>), flow density(ρ), constant (a=26.4)에 관한 식으로 제안하였으나, coarse sand grain 범위의 적용은 확인되지 않은 상태이다.

또한 down stream 변화나 지형적인 흐름은 Z<sub>0</sub>에서 내부 경계층의 존재로 인해 바닥부근에서의 유속 profile 예측을 어렵게 한다는 근거에 의해 1986년 Dyer는 최소자승법을 사용하여 상수 a를 도입한 (2)식을 제안하였다.

$$U = \frac{U_*}{k} \left( \ln \frac{Z + a}{Z_0} \right) \dots\dots\dots(2)$$

일반적으로 흐름에 대한 점성과 속도 구배를 고려하여 유속 1% 수심의 개략치로 간주되는 경계층 아래의 유속층을 viscous sublayer, buffer layer, logarithmic layer, outer layer등으로 구분할 경우 viscous sublayer에서의 유속은 U<sub>\*</sub><sup>2</sup>=ν(dU/dZ)를 dU/dZ와 shear stress의 증가에 따라 viscous sublayer의 두께가 얇아지는 내용 등을 포함한 조건으로 적분한 식 (U/U<sub>\*</sub>)=(Z U<sub>\*</sub>/ν)을 적용시키면, 유속 분포식은 friction velocity와 shear stress와의 관계에 의한 (3)식으로 정리될 수 있다.

$$(U/U_*) = (1/k) \ln(Z/D) + B' \dots\dots\dots(3)$$

D : grain diameter                      B' : constant

또한 흐름에서 경계층의 흐름 구조를 표현하는데 중요한 인자로 사용되는 grain reynolds number  $R_*$ 에 관한 식으로 정리하면 (4)식과 같이 표현할 수 있다

$$(U/U_*) = A \ln(Z U_*/\nu) + B \dots\dots\dots(4)$$

A : constant                                      B : constant  
 $\nu$  : fluid kinematic viscosity

Nikuradse는 (3),(4)식에서 grain reynolds number  $R_*$ 가 70보다 큰 경우의 rough turbulent와  $R_*$ 가 5보다 작은 경우의 smooth turbulent로 구분하여  $R_* > 70$ 인 경우 (5)식,  $R_* < 5$ 인 경우 (6)식으로 정리하였다.

$$(U/U_*) = 2.5 \ln(Z/D) + 8.5 \dots\dots\dots(5)$$

$$(U/U_*) = 2.5 \ln(Z U_*/\nu) + 5.5 \dots\dots\dots(6)$$

본 논문에서는 상기의 여러 식에서 논의된  $U_*$ 와 그에 따른 입자이동 특성인 dimensionless particle parameter, particle mobility parameter, critical bed shear velocity 등과 (1),(2)식에 따른 acceleration length scale  $\lambda$ 와, 상수  $\alpha$ 값을 계산하여 그 상호 관계를 검토하였다.

## 2. 본 론

유속  $U$ 를 50~0.1의 값으로 하고, 수심  $Z$ 를  $U$ 의 1%값이 포함되며 logarithmic velocity profile를 나타낼 때 가장 적합한 displacement height  $dZ$ 인 20 아래의 값으로 택하여 particle reynolds number  $R_*$ 를 계산한 결과,  $D$ 가 2.7인 경우 particle reynolds number  $R_*$ 는 1.99~1741.99,  $D$ 가 1.5인 경우 1.00~813.52,  $D$ 가 0.8인 경우 0.48~370.69,  $D$ 가 0.2인 경우 0.10~70.14,  $D$ 가 0.1인 경우 0.046~31.27로 나타나며,  $D$ 가 0.8인 sand grain에 대한 수심 및 유속별  $R_*$ 값은 아래 <표1>과 같이 계산 되어진다.

<표 1>의  $D=0.8$ 인 경우  $R_* < 5$ 인 경계는  $U=1.0$  전후이며,  $R_* > 70$ 인 경계는  $U=10$  전후로 나타난다.

입자의 입경과 유속에 대해 계산된  $R_*$ 값을 근거로 한 friction velocity  $U_*$  계산은,  $R_*$ 가 5보다 큰 경우는 식  $(U/U_*) = 2.5 \ln(Z/D) + 8.5$ 을 적용하고 5보다 작은 경우는 식  $(U/U_*) = 2.5 \ln(Z U_*/\nu) + 5.5$ 를 적용한 결과,  $D$ 가 1.5인 경우  $U_* = 0.008 \sim 5.42$ ,  $5 < R_*$ 인 경계치는  $U = 1.0 \sim 0.1$ ,  $D$ 가 0.8인 경우  $U_* = 0.008 \sim 4.63$ ,  $5 < R_*$ 인 경계치는  $U = 1.0$ ,  $Z = 18 \sim 16$ ,  $D$ 가 0.2인 경

우  $U_* = 0.008 \sim 3.50$ ,  $5 < R_*$ 인 경계치는  $U = 5.0$ ,  $Z = 20 \sim 18$ ,  $D$ 가 0.1인 경우  $U_* = 0.008 \sim 3.12$ ,  $5 < R_*$ 인 경계치는  $U = 10.0$ ,  $Z = 10 \sim 8$ ,  $D$ 가 0.05인 경우  $U_* = 0.008 \sim 2.82$ ,  $5 < R_*$ 인 경계치는  $U = 20.0$ ,  $Z = 4 \sim 6$ 으로 계산된다.

<표 1> PARTICLE REYNOLDS NUMBER  $R_*$  -  $D=0.8$

Z	U	50.000	40.000	30.000	20.000	10.00	7.500	5.000	2.500	1.000	.100
20.000		241.73	193.38	145.03	96.69	48.34	36.25	24.17	12.08	4.83	.48
18.000		245.64	196.51	147.38	98.25	49.12	36.84	24.56	12.28	4.91	.49
16.000		250.16	200.13	150.10	100.06	50.03	37.52	25.01	12.50	5.00	.50
14.000		255.50	204.40	153.30	102.20	51.10	38.32	25.55	12.77	5.11	.51
12.000		261.94	209.55	157.16	104.77	52.38	39.29	26.19	13.09	5.23	.52
10.000		270.00	216.00	162.00	108.00	54.00	40.50	27.00	13.50	5.40	.54
8.000		280.57	224.45	168.34	112.22	56.11	42.08	28.05	14.02	5.61	.56
6.000		295.48	236.38	177.28	118.19	59.09	44.32	29.54	14.77	5.90	.59
4.000		319.39	255.51	191.63	127.75	63.87	47.90	31.93	15.96	6.38	.63
2.000		370.68	296.55	222.41	148.27	74.13	55.60	37.06	18.53	7.41	.74

$D=2.7$ 인 gravel grain에 대한 friction velocity 값은 아래 <표 2>와 같이 계산되며, <표 2>에 의하면  $D$ 가 2.7인 경우 friction velocity  $U_* = 0.008 \sim 3.70$ ,  $5 < R_*$ 인 경계치는  $U = 1.0 \sim 0.1$ 로 나타난다.

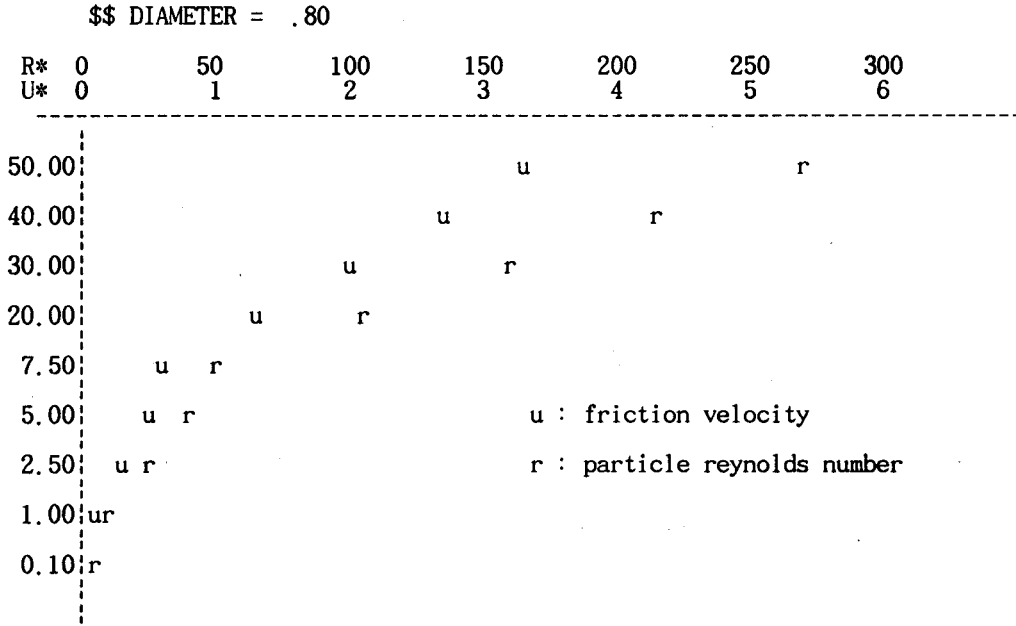
<표 2> FRICTION VELOCITY  $U_*$  -  $D=2.7$

Z	U	50.00	40.00	30.00	20.00	10.00	7.50	5.00	2.50	1.00	.10
20.000		3.7020	2.9616	2.2212	1.4808	.7404	.5553	.3702	.1851	.0740	.0080
18.000		3.7756	3.0205	2.2654	1.5103	.7551	.5663	.3776	.1888	.0755	.0082
16.000		3.8615	3.0892	2.3169	1.5446	.7723	.5792	.3861	.1931	.0772	.0083
14.000		3.9637	3.1710	2.3782	1.5855	.7927	.5946	.3964	.1982	.0793	.0085
12.000		4.0886	3.2709	2.4532	1.6354	.8177	.6133	.4089	.2044	.0818	.0088
10.000		4.2469	3.3975	2.5481	1.6988	.8494	.6370	.4247	.2123	.0849	.0091
8.000		4.4581	3.5665	2.6749	1.7833	.8916	.6687	.4458	.2229	.0892	.0095
6.000		4.7636	3.8109	2.8582	1.9054	.9527	.7145	.4764	.2382	.0953	.0100
4.000		5.2728	4.2182	3.1637	2.1091	1.0546	.7909	.5273	.2636	.1055	.0109
2.000		6.4518	5.1615	3.8711	2.5807	1.2904	.9678	.6452	.3226	.1290	.0128
AVERAGE		4.4585	3.5668	2.6751	1.7834	.8917	.6688	.4458	.2229	.0892	.0089

각 입자별 유속에 대한 particle reynolds number와 friction velocity의 변화는 거의 비슷

境界層 흐름 特性

한 양상을 보이며, U=20 전후에서 particle reynolds number와 friction velocity가 변함응 나타낸다. D=0.8, Z=10일 경우의 유속에 대한 particle reynolds number와 friction velocity는 아래 그림과 같이 나타난다.



particle diameter가 gravel, sand 영역인 2.7 ~ 0.1에 대하여 입자이동 parameter인 dimensionless particle parameter  $D_*$ , critical particle mobility parameter  $\theta$ , critical bed shear velocity  $U_{cr}$  등의 특성은 다음과 같이 나타난다.

DIAMETER	2.70	1.50	.80	.20	.10	.05
PARTICLE PARAMETER	341.3793	189.6552	101.1494	25.2874	12.6437	6.3218
PARTICLE MOBILITY PARAMETER	.0550	.0550	.0034	.0051	.0032	.0430
CRITICAL BED SHEAR VELOCITY	10.9573	8.1671	1.4847	.9076	.5057	1.3186

$s = \rho_s - \rho$  일 경우  $D_* = D[(s-1)g/\nu^2]^{1/3}$  로 표현되는 dimensionless particle parameter는 입경에 따라 대략적으로  $D=0.8$ 를 경계로 하여 100의 값을 가지며,  $U_*^2/[(s-1)gD]$ 로 표현되는 particle mobility parameter  $\theta$ 는  $D_*$ 값의 조건에 따라 0.0032~0.055의 값을 가진다. 또한

表 元 一

$[(s-1)gd_0]^{1/2}$  으로 표현되는 critical bed shear velocity  $U_{cr}$ 은 10.95~1.32의 값으로 계산된다.

(5),(6)식으로 계산되어진 friction velocity  $U$ 와 각 입경에 대한 critical bed shear velocity  $U_{cr}$ 값으로 주어지는 transport stage parameter  $U_*^2 - U_{cr}^2 / U_{cr}^2$ 를 계산하고, transport stage parameter와 particle parameter  $D$ 로서 입자의 1차 saltation 조건을 검토한 결과,  $D=2.7$ 과  $D=1.5$ 의 입자는 상기 유수조건에서는 saltation이 일어나지 않으며  $D=0.8$ ,  $U=20\sim50$ 에서 saltation이 발생하며 saltation 높이는 1.0~23.76의 범위로 주어진다.  $D=0.2$ ,  $D=0.1$ 의 입자는  $U=10\sim50$ 의 유속에서 saltation이 일어나며 saltation 높이는  $D=0.2$ 의 경우는 0.34~65.27,  $D=0.1$ 의 경우는 saltation 높이가 0.1~212.43로 주어진다.

<표 3> ACCELERATION LENGTH SCALE  $\lambda$  -  $D=0.2$

Z	U	50.00000	30.00000	10.00000	7.50000	5.00000	2.50000	1.00000	.10000
20.000		417287.6	417620.1	417620.1	417620.1	1376.7	1972.5	471.7	165.0
18.000		375694.5	375694.5	375844.2	375694.5	375844.2	1861.3	429.9	149.4
16.000		334068.2	333935.2	333802.3	333935.2	333802.3	1758.2	387.6	133.7
14.000		292175.9	292175.9	292059.6	292175.9	292059.6	1651.9	345.0	117.9
12.000		250416.6	250416.6	250416.6	250416.6	250416.6	1550.6	301.7	102.0
10.000		208657.3	208657.3	208657.3	208657.3	208657.3	1457.9	257.8	85.9
8.000		166898.0	166898.0	166898.0	166898.0	166898.0	1393.1	212.9	69.7
6.000		125138.7	125138.7	125138.7	125138.7	125138.7	1399.7	166.9	53.3
4.000		83379.4	83379.4	83379.4	83379.4	83379.4	1885.0	119.2	36.6
2.000		41620.1	41620.1	41620.1	41620.1	41620.1	1095.4	68.6	19.4

<표 4> DYER COSTANT  $\alpha$  -  $D=0.2$

Z	U	50.000	30.000	10.000	7.500	5.000	2.500	1.000	.10000
20.000		-.0239	-.0239	-.0239	-.0239	8.7544	-4.4769	-13.0690	-19.0331
18.000		-.0215	-.0215	-.0215	-.0215	-.0215	-3.8645	-11.6787	-17.1139
16.000		-.0191	-.0191	-.0192	-.0191	-.0192	-3.2545	-10.2961	-15.1967
14.000		-.0168	-.0168	-.0168	-.0168	-.0168	-2.6720	-8.9213	-13.2803
12.000		-.0144	-.0144	-.0144	-.0144	-.0144	-2.1098	-7.5585	-11.3660
10.000		-.0120	-.0120	-.0120	-.0120	-.0120	-1.5749	-6.2063	-9.4539
8.000		-.0096	-.0096	-.0096	-.0096	-.0096	-1.0690	-4.8705	-7.5444
6.000		-.0072	-.0072	-.0072	-.0072	-.0072	-.6091	-3.5551	-5.6384
4.000		-.0048	-.0048	-.0048	-.0048	-.0048	-.2063	-2.2684	-3.7378
2.000		-.0024	-.0024	-.0024	-.0024	-.0024	.0931	-1.0331	-1.8465

(1),(2)식에 따른 acceleration length scale  $\lambda$ 와 Dyer constant  $\alpha$ 값을 조건에 따라 계산한

결과는  $D=0.2$ 인 경우 acceleration length scale 값은 <표 3>과 같고, 각 입경에 대해 acceleration length scale과 앞에서 논의된 particle reynolds number와 비교하였을 때 대부분  $R_* = 5$ 를 전후로 acceleration length scale 값이 큰 차이를 나타낸다.

(2)식에 의한 Dyer constant  $\alpha$ 는  $R_* > 5$ 인 경우  $-0.239 \sim 0.0024$ 의 값으로 거의 일정하게 나타나고 있으나,  $R_* < 5$ 인 경우  $D=2.7$ 일때  $0.07 \sim -7.0$ ,  $D=1.5$ 일때  $-0.84 \sim -12.7$ ,  $D=0.8$ 일때  $-16.1 \sim 7.7$ ,  $D=0.2$ 와  $D=0.1$ 일때  $-1.0 \sim -19.0$ 의 값을 가지며,  $R_* < 5$ 인 경우는  $\alpha$ 의 변화가 상당히 복잡하게 나타난다.

유속 분포식을 비교적 단순화하기 위한 (1)식에서의 acceleration length scale  $\lambda$ 와 Dyer 식에서의  $\alpha$ 값과의 관계는 비교적 유속과는 무관하나, smooth turbulent에서는 약간의 차이를 나타내며, 평균적으로  $\alpha = 2.0 \times 10^6 - 0.013\lambda$ 의 관계를 가진다.

### 3. 요약

경계층에 관한 해석을 이용하여 퇴적물 이동의 모델화를 시도하기 위한 기초작업으로, 흐름 및 입자의 조건 등을 수학적 방법을 사용하여 특성을 고찰하고,  $U_*$ 와 그에 따른 입자이동 특성인 dimensionless particle parameter, particle mobility parameter, critical bed shear velocity 등과 (1),(2)식에 따른 상수  $\lambda, \alpha$ 값을 계산하여 그 상호관계를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Particle reynold's number  $R_*$ 는  $D$ 가 2.7인 경우  $1.99 \sim 1741.99$ ,  $D$ 가 1.5인 경우  $1.00 \sim 813.52$ ,  $D$ 가 0.8인 경우  $0.48 \sim 370.69$ ,  $D$ 가 0.2인 경우  $0.10 \sim 70.14$ ,  $D$ 가 0.1인 경우  $0.046 \sim 31.27$ 로 계산된다.
2.  $D=2.7$ 인 경우  $U_* = 0.008 \sim 3.70$ ,  $5 < R_*$ 인 경계치는  $U = 1.0 \sim 0.1$ ,  $D$ 가 1.5인 경우  $U_* = 0.008 \sim 5.42$ ,  $5 < R_*$ 인 경계치는  $U = 1.0 \sim 0.1$ ,  $D$ 가 0.8인 경우  $U_* = 0.008 \sim 4.63$ ,  $5 < R_*$ 인 경계치는  $U = 1.0$ ,  $Z = 18 \sim 16$ ,  $D$ 가 0.2인 경우  $U_* = 0.008 \sim 3.50$ ,  $5 < R_*$ 인 경계치는  $U = 5.0$ ,  $Z = 20 \sim 18$ ,  $D$ 가 0.1인 경우  $U_* = 0.008 \sim 3.12$ ,  $5 < R_*$ 인 경계치는  $U = 10.0$ ,  $Z = 10 \sim 8$ ,  $D$ 가 0.05인 경우  $U_* = 0.008 \sim 2.82$ ,  $5 < R_*$ 인 경계치는  $U = 20.0$ ,  $Z = 4 \sim 6$ 으로 주어진다.
3. Dimensionless particle parameter는 대략적으로  $D=0.8$ 를 경계로 하여 100의 값을 가지며, particle mobility parameter  $0.0032 \sim 0.055$ 의 값을 가지고, critical bed shear velocity는  $10.95 \sim 1.32$ 의 값으로 계산된다.
4. 입자의 1차 saltation 조건을 검토한 결과,  $D=2.7$ 과  $D=1.5$ 의 입자는 saltation이 일어나지 않으며  $D=0.8$ ,  $U = 20 \sim 50$ 에서 saltation이 발생하며 saltation 높이는  $1.0 \sim 23.76$ ,  $D=0.2$ ,  $D=0.1$ 의 입자는  $U = 10 \sim 50$ 의 유속에서 saltation이 일어난다.

참고문헌

1. A.D.Heathershaw and D.N.Langhorne, Observations of Near-bed Velocity Profiles and Seabed Roughness in Tidal Currents Flowing over Sandy Gravels , Coastal and Shelf Science, 1988
2. Althausen, J.D. and Kjerfve, B.J., Distribution of suspended Sediment in a Partially Mixed Estuary, Charleston Harbor, South Carolina, U.S.A., Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, vol. 35, No.4, October, 1992
3. Dyer, K.R., Estuary Hydrography and Sediment, Cambridge University Press, 1979
4. Dyer, K.R., Current Velocity Profiles in a Tidal Channel, Geophys. J. Roy. Astronom. Soc. 22, 1970
5. John A. Reizer, Numerical Study of Continuous Saltation, Journal of the Hydraulics Division, 1978 sep., 1305-1321
6. John F. A. Sleath, Transition in Oscillation Flow over Rough Beds, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, vol. 114, No.1, 1988
7. Norman, L. Jones and David R. Richards , Mesh Generation for Estuarine Flow Modeling, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, vol. 118, No.6, 1992
8. V.A. Ern and M.D. Smooke, Vorticity-Velocity Formulation for Three-Dimensional Steady compressible Flows, Journal of Computational Physics, vol. 105, No. 1, March, 1993
9. Wright, L.D., Boon, J.D., Xu, J.P. and Kim, S.C., The Bottom Boundary Layer of the Bay Stem Plains Environment of Lower Chesapeake Bay, Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol.35, No.1, July, 1992