

## 만내수역의 유기오염물질자체정화특성

최 호 정

조선동해연안의 만내수역들에서는 해안선의 굴곡이 심한 경우에 구석진 부분수역들에서 바다물순환흐름속도가 매우 느리고 그에 따라 막흐름자체정화능력이 다른 수역들에 비하여 훨씬 미약할수 있다. 이러한 수역들에서는 연안도시나 농축산지들이 가까이에 있는 경우 유기물질들이 루적될수 있다. 이로부터 논문에서는 만내수역에서 막흐름정화능력이 미약한 수역을 찾고 그 수역에서 유기물질의 자체분해에 의한 정화특성을 평가하기 위한 연구를 진행하였다.

### 1. 막흐름정화특성분석

○만과 같이 비교적 얇은 연안수역에서는 막흐름정화마당분포변동분석에 다음과 같은 2차원막흐름자체정화률방정식을 쓸수 있다.[2]

$$\frac{\partial S_r}{\partial t} + u \frac{\partial S_r}{\partial x} + v \frac{\partial S_r}{\partial y} = \frac{1}{H} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( HK_x \frac{\partial S_r}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( HK_y \frac{\partial S_r}{\partial y} \right) \right] \quad (1)$$

$$S_r|_{V_r=0} = 0 \quad (2)$$

여기서  $S_r$ 는 막흐름자체정화률,  $u$ ,  $v$ 는 흐름속도의  $x$ ,  $y$  축방향성분들,  $H$ 는 바다물층 깊이,  $K_x$ ,  $K_y$ 는 막흐름확산계수의  $x$ ,  $y$  축방향성분들,  $V_r$ 는 원천수역을 의미한다.

방향교체계차망에서 양형태의 계차방정식을 다음과 같이 쓸수 있다.

$(i, j, n)$ 에서 식 (1)은

$$\begin{aligned} S_{r,i,j}^{n+\frac{1}{2}} = & S_{r,i,j}^n - \frac{\Delta t}{8\Delta s} \left[ \left( u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \right) (S_{r,i+1,j}^n - S_{r,i,j}^n) + \left( v_{i,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i,j-\frac{1}{2}}^n \right) (S_{r,i,j+1}^n - S_{r,i,j-1}^n) \right] + \\ & + \frac{\Delta t}{4\Delta s^2} \left[ \left( H_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) K_{x,i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} (S_{r,i+1,j}^n - S_{r,i,j}^n) - \left( H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) K_{x,i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} (S_{r,i,j}^n - S_{r,i-1,j}^n) + \right. \\ & \left. + \left( H_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) K_{y,i,j+\frac{1}{2}}^n (S_{r,i,j+1}^n - S_{r,i,j}^n) - \left( H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}} \right) K_{y,i,j-\frac{1}{2}}^n (S_{r,i,j}^n - S_{r,i,j-1}^n) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$(i, j, n+1/2)$ 에서 식 (1)은

$$\begin{aligned} S_{r,i,j}^{n+1} = & S_{r,i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{8\Delta s} \left[ \left( u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \left( S_{r,i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - S_{r,i,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) + \left( v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} + v_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} \right) \left( S_{r,i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - S_{r,i,j-1}^{n+\frac{1}{2}} \right) \right] + \\ & + \frac{\Delta t}{4\Delta s^2} \left[ \left( H_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) K_{x,i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \left( S_{r,i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - S_{r,i,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) - \left( H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) K_{x,i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \left( S_{r,i,j}^{n+\frac{1}{2}} - S_{r,i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) + \right. \\ & \left. + \left( H_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) K_{y,i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} (S_{r,i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - S_{r,i,j}^{n+\frac{1}{2}}) - \left( H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}} \right) K_{y,i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} (S_{r,i,j}^{n+\frac{1}{2}} - S_{r,i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}) \right] \end{aligned}$$

$$+ \left( H_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) K_{y_{i,j+\frac{1}{2}}}^{n+1} \left( S_{r_{i,j+1}}^{n+\frac{1}{2}} - S_{r_{i,j}}^{n+\frac{1}{2}} \right) - \left( H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}} \right) K_{y_{i,j-\frac{1}{2}}}^{n+1} \left( S_{r_{i,j}}^{n+\frac{1}{2}} - S_{r_{i,j-1}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (4)$$

이 문제는 다음과 같은 2차원바다물운동방정식을 편립하여야 흐름마당과 동시에 풀 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \tau u = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \tau v = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

여기서  $\tau = \frac{g(u^2 + v^2)^{1/2}}{C_Z^2 H}$ ,  $C_Z$ 는 쉘지결수,  $f$ 는 코리올리보조변수,  $g$ 는 중력가속도이다.

식 (5)–(7)에 의하면 만내의 흐름마당이 미약한 구역을 찾을 수 있다.

○만에서 등반도의 남쪽끝부분과 7반도의 서쪽끝부분을 연결한 선과 해안선을 경계로 하는 연구수역을 방향교체계차망으로 분할하고 막흐름정화률마당특성을 분석하는데 지형학적으로 구분되는 몇개의 구역별로 상대적분석을 하여 정화률이 가장 낮으면서도 유기물질의 류입가능성이 높은 수역을 먼저 찾는다.

현지측정자료에 의하면 등반도의 남쪽끝부분과 7반도의 북쪽끝부분을 연결한 부근에서 최대흐름속도는 0.05m/s이며 흐름방향은 주로 등반도쪽에서는 연구수역으로 들어가며 7반도 쪽에서는 바다쪽으로 나가는 경향이다. 이러한 조건에 맞게 흐름마당을 먼저 분석하였다.

2007년 3월 7일–9일사이 4개의 지점에서 관측한 흐름속도자료들중에서 매 지점의 최대흐름속도자료와 계산한 최대흐름속도값을 비교한 결과 최대오차가 0.6cm, 평균 0.4cm, 상대오차는 평균 8%였다.

분석결과를 보면 전반적인 계산흐름구조가 현지흐름마당을 근사하게 재현한다는 것을 알 수 있다. 즉 만의 남쪽수역으로 가면서 흐름이 너무 미약하여 정량적으로 검토하기는 어려웠으나 흐름이 비교적 있는 구역과 미약한 구역이 뚜렷해졌으며 7반도의 안쪽 수역이 매우 미약한 구역으로 나타났다.

이 흐름모형의 액체경계조건으로 최대흐름속도값을 줄 때의 막흐름정화률마당을 분석한 결과 7반도 안쪽 수역의 정화률이  $S_r = 0.5\%$ 미만으로서 막흐름정화능력이 매우 미약하다는 것을 알 수 있다.

이 수역에 일단 유기물질이 들어오는 경우 순수 흐름에 의하여 정화되는 특성을 우의 막흐름자체정화률의 계차방정식으로 계산분석한데 의하면 0.5%미만까지 정화되는데 105일이상 걸린다는 것을 알 수 있다.

## 2. 흐름마당에 대한 분석모형

7반도의 안쪽 수역연안에는 특산물모임구역이 크고 해안도시를 끼고있으므로 유기물질이 들어와 축적될 수 있는 가능성이 크다.

따라서 유기물질의 생화학적 자체분해에 의한 정화과정을 분석하여 일단 이 수역에 들어온 유기물질이 얼마만한 시간에 어느 정도 정화되는가를 과학적으로 밝히기로 하였다.

유기물질의 생화학적 자체분해과정만 표시하면 다음과 같이 쓸수 있다.[1]

$$\frac{dC}{dt} = -kC$$

어떤  $t$  시간사이 자체정화에 의한 농도변화는 웃식을 적분하여 얻을수 있다.

$$C_t = C_0 e^{-kt}$$

$k$  를 구하면

$$k = -\frac{1}{t} \ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)$$

$t$  를 구하면

$$t = -\frac{1}{k} \ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)$$

7반도의 안쪽 수역에서 뜬 시료에 도시오수정화장의 정화직전의 유기물질함량이 높은 오수를 일정한 량을 넣은 다음 각각 시료물온도를 8, 15, 25°C로 항온을 보장하고 COD의 12일간 변화과정을 분석하였다.(표, 그림)

표. COD 자체정화과정

T/°C	변수	날 자												$k_{\text{평}}$ /d <sup>-1</sup>
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
8	C/(mg · L <sup>-1</sup> )	50.2	47.8	45.7	43.8	42.2	40.8	39.4	38.2	36.9	35.9	35.3	34.3	0.03
	$k_t$ /d <sup>-1</sup>		0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	
15	C/(mg · L <sup>-1</sup> )	50.2	46.8	43.8	41.0	38.7	36.6	43.7	33.1	31.7	30.5	29.3	28.1	0.05
	$k_t$ /d <sup>-1</sup>		0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	
25	C/(mg · L <sup>-1</sup> )	50.2	43.6	39.5	36.6	34.2	32.3	30.7	29.3	28.0	26.9	25.8	24.7	0.06
	$k_t$ /d <sup>-1</sup>		0.14	0.1	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	

표에서 보는바와 같이 처음 유기물질농도가 높은 구간에서는 자체정화결수가 크고 농도가 점차 작아지면서 자체정화결수도 작아진다. 한편 물온도가 높을수록 자체정화결수는 커진다.(그림)

유기오염농도의 허용한계를 COD값으로서  $S=5\text{mg/L}$ 를 취한다면 초기농도  $C_0$  으로부터 허용한계까지 낮아질 기간은 날자수로서 다음과 같이 표시된다.

$$t_e = -\frac{1}{k} \ln\left(\frac{S}{C_0}\right)$$

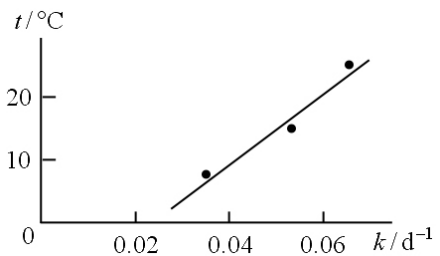


그림. 물온도에 따르는 자체정화결수

표에서 보는바와 같이 초기농도로부터 약 10일까지는 COD가 비선형적으로 감소되지만 그 이후부터는 점차 선형적으로 감소된다는것을 보여준다. 선형적으로 감소되기 시작하여서부터 허용한계까지 낮아지는 기간은 8°C의 조건에서는 약 69일간, 15°C의 조건에서는 약 44일간, 25°C의 조건에서는 약 38일간이 걸린다는것을 알수 있다.

이것은 연구수역에서 큰물과 같은 자연적원인으로 유기오염물질의 농도가 급격히 증대되는 경우에 그것이 생화학적으로 자연히 감소되는 기간이 얼마나 되는가를 결정하는데 효과적으로 리용할수 있는 방법으로 된다.

## 맺 는 말

만내수역에서 유기물질의 자체정화특성을 결정하려고 할 때 막흐름에 의한 정화효과가 미약한 죽은물구역에서는 순수 생화학적으로 분해되는 자체정화효과를 반드시 고려하여야 한다.

우에서 제기한 방법에 의하면 만내수역의 현재 유기물질농도가 COD지표로 얼마인가를 측정하였다면 그것이 허용한계아래로 낮아지는 기간을 정확히 결정할수 있으며 그로부터 해당 수역의 오염부하를 과학적으로 조절할수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 41, 9, 91, 1995.
- [2] 최호정; 해양환경보호학, 김일성종합대학출판사, 101~106, 주체106(2017).

주체107(2018)년 4월 5일 원고접수

## Characters of Self-purification of Organic Compounds in Bay Inside Area

*Choe Ho Jong*

We suggested the methodology to elucidate characters of self-purification of organic compounds in bay inside area and applied in Bay “○”.

We analysed flow structure in the bay by the motion equation of sea water and found area that capacity of turbulent flow purification was feeble due to the weaking flow.

In such area self-purification character like biochemical change was elucidated by COD analyzing method.

Key words: Self-purification by turbulent flow, ratio of self-purification, COD