

# 하천에 유입된 오염물질의 플러싱 효과 분석

## Analysis of Flushing Effects for Input Contaminants in River

안용민\*, 김수열\*\*, 이준호\*\*\*, 윤세의\*\*\*\*

Yong Min An, Soo Youl Kim, Joon Ho Lee, Sei Eui Yoon

### 요 지

오염물질의 유입 유형은 일정한 농도를 가진 오염물질이 일정한 비율로 연속적으로 유입되는 경우와 순간적으로 특정한 농도를 가진 오염물질이 하천으로 유입되는 경우로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 오염물질에 대해 댐 방류량을 일시적으로 증가시켜서 희석 및 세척시키는 플러싱(flushing) 효과에 관하여 연구하였다. 실측한 수리인자를 이용하여 적용성이 크다고 발표된 경험식에 의하여 확산계수를 결정하였다. 플러싱에 의한 오염물질의 희석정도 및 확산특성을 파악하기 위해서 RMA-4 모형을 잠실수중보~신곡수중보 구간에 적용하였다. 정체되어있는 경우와 순간적으로 유입되는 경우, 성산대교 부근에서 농도가 1ppm이하로 감소하는 시간을 각 유량별로 분석하였다. 댐 방류량에 의한 플러싱을 시도할 경우에 본류의 오염물질이 지류로 역류하는 범위를 파악할 수 있었다.

### 1. 서 론

한강은 오랜 기간에 걸쳐 시민의 상수원 및 수자원으로 이용되어 왔으며, 한강을 중심으로 수도권내의 인구의 증가, 경제 성장에 따른 공장용지의 증가, 지역개발사업의 추진과 주택보급에 따른 도시화 및 상수도 보급률의 확대에 따라 용수수요의 지속적 증가는 하천에 오염물질이 유입되는 불가피한 요인으로 작용하고 있다. 또한, 한강 주변에는 수변공원, 물놀이 관련 사회편의시설 등이 위치해 있으며, 한강중류에 취수장이 집중되어 있어 한강 상류에서 불시의 오염물질이 유입되는 사고는 대형 재난사고로 발전될 가능성을 가지고 있다. 특히, 갈수기에는 하천 유량이 작기 때문에 하천으로 유입된 오염물질의 확산 및 혼합과정은 평수기와 홍수기와는 다른 양상을 보이는 것으로 알려져 왔다.

오염물질의 플러싱 효과에 대한 연구는 국외 및 국내 하천의 하구, 호소수 및 만에 대한 연구가 대부분을 이루고 있다. Walter Debler등(1996)은 칠레의 Valdivia 하구에서 실측과 실험을 통하여 하천 바닥의 염수를 세척하기 위하여 밀도 프르드수의 범위를 연구하였고, Dinesh Kumar등(1999)은 인도 서해안의 Vashishti 하구에서 조수의 영향과 하천유입유량에 의한 염수의 플러싱 시간 규모를 연구하였다. 국내의 경우는 서울시 정개발연구원(1999)은 댐 방류량의 변동에 따른 WASP5 모형을 이용하여 한강 조류 농도의 플러싱 효과를 연구하였다. 본 연구에서는 한강하류부의 흐름특성 및 오염물질 거동 특성을 파악을 위하여 RMA-2 및 RMA-4 모형을 한강하류부에 적용하였다. 갈수기 하천에 순간적으로 유입된 또는 정체된 오염물질의 거동특성에 많은 영향을 주는 합리적인 확산계수를 이용한 플러싱 효과의 연구는 매우 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 한강하류부에서 갈수기에 순간적으로 큰 농도를 갖는 오염물질이 유입되었을 경우와 특정농도를 갖는 오염물질이 한강하류부에 정체되어 있을 경우 댐 방류량의 변화에 따른 오염물질의 거동특성과 플러싱 효과를 파악하였다. 본 연구에서는 만약의 오염물질 유입 사고시 오염물질의 도달시간 및 농도를 예측하여 취수

\* 경기대학교 대학원 토목공학과 석사과정 · e-mail : anym1112@hotmail.com  
\*\* 경기대학교 대학원 토목공학과 석사과정 · e-mail : klaatujk@hotmail.com  
\*\*\* 경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정 · e-mail : sof814@hotmail.com  
\*\*\*\* 경기대학교 토목·환경공학부 교수 · e-mail : syyoon@kuic.kyonggi.ac.kr

장의 오염을 최소화하거나 빠르게 대처할 수 있는 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 기본이론

RMA-2 지배방정식은 3차원 Navier-Stokes 방정식을 수심방향으로 적분한 2차원 천수방정식이며, 연속방정식과 운동량 방정식으로서 식 (1)~(3)와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} (\epsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) + g(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{n^2 g u}{h^{3/4}} (u^2 + v^2)^{1/2} - \frac{\xi}{h} V_a^2 \cos \phi - 2w v \sin \phi = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho} (\epsilon_{xx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) + g(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{n^2 g v}{h^{3/4}} (u^2 + v^2)^{1/2} - \frac{\xi}{h} V_a^2 \cos \phi + 2w u \sin \phi = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $h$ 는 수심,  $u, v$ 는 수심방향의 평균유속,  $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$ 는  $x, y$  방향의 난류교환계수,  $a$ 는 하상고,  $n$ 은 Manning의 조도계수,  $\xi$ 는 풍력전단계수,  $V_a$ 는 풍속,  $\psi$ 는 풍향,  $\omega$ 는 지구의 회전각속도,  $\Phi$ 는 국지 위도이다. RMA-4 모형의 지배방정식은 비압축성 난류 전단 흐름에서 보존물질에 대하여 수심방향으로 적분한 2차원 이송-확산 방정식으로 식(4)와 같다.

$$h \left( \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} - E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \sigma + kC + \frac{R(C)}{h} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서,  $C$ 는 오염물질의 농도,  $E_x, E_y$ 는 각각  $x, y$  방향의 확산계수,  $\sigma$ 는 오염물질의 생성 또는 소멸항,  $k$ 는 오염물질의 감소계수를 나타낸다.

## 3. 오염물질 방류량에 따른 거동분석

연구 대상 구간은 잠실수중보와 신곡수중보 구간이다. 댐 방류량의 변화에 따른 오염물질의 거동을 분석하기 위해서 RMA-2의 유량 조건을 500cms, 1000cms, 1500cms, 2000cms의 4가지 경우를 가정하였으며, 갈수시의 유량은 200cms로 고정하였다. 오염물질 유입 후 1시간 이후에 1시간동안 댐 방류량이 증가하는 것으로 가정하여 유황을 분석하였다. RMA-4 모형의 수행에 있어서 경계조건의 입력은 가장 중요한 요건으로서 종확산계수는 50m<sup>2</sup>/s, 횡확산계수는 종확산계수의 1/20으로 고정하였으며(윤세의,2003), 본 모형의 하류 경계조건인 신곡수중보의 수위는 인접 수위 관측소인 행주대교 수위를 적용하였다.

### 3.1 정체된 오염물질

갈수기 하천에 유입된 오염물질의 농도분포를 파악하기 위해서 적용구간의 한남대교와 반포대교 사이 지점에 오염물질 100,000ppm이 정체되어 있을 경우 댐 방류량을 주어진 유량들로 1시간 동안 방류하여 성산대교 부근 단면 중앙 지점에서 오염물질의 농도가 1ppm이하로 떨어질 때의 농도분포를 파악하였다. 단, 갈수시 유량은 200cms로 동일하며, 본류 및 지류의 오염물질의 유입은 없다고 가정하였다. 최초 오염물질의 정체수역은 한남대교와 반포대교 중간 지점으로 그림 3.1과 같다.



그림 3.1 정체된 오염물질의 최초 농도분포

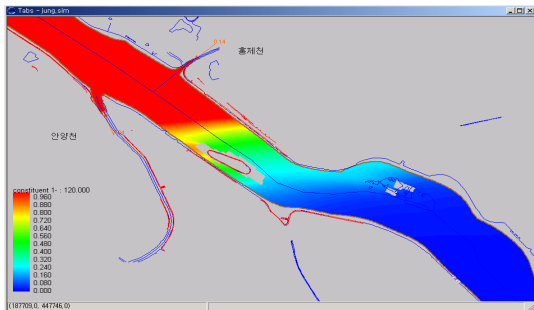


그림 3.2 성산대교부근에서 오염물질의 농도분포(200cms, 120시간후)

그림 3.2는 정체되어있는 오염물질에 2000cms를 방류했을 때 약 120시간 후의 오염물질의 농도분포를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 안양천과 홍제천으로 오염물질이 유입되는 것을 관찰할 수 있으며, 안양천과 홍제천의 유입유량과 지류의 위치로 인하여 좌우안의 농도분포가 차이를 나타내는 것으로 판단된다. 하천에 정체되어 있던 오염물질은 댐 방류량이 클수록 그 희석속도가 빠르게 나타났으며, 오염물질의 희석 농도가 급속히 감소되고 있었다.

### 3.2 순간적으로 유입된 오염물질

갈수기 하천에 순간적으로 유입된 오염물질의 거동 분석을 하기 위해서 잠실대교 부근에서 800,000ppm의 농도를 가진 오염물질이 30분간 유입하였을 경우 1시간 뒤 댐 방류량을 주어진 유량들로 한시간 동안 방류하여 성산대교 부근 단면 중앙 지점에서 오염물질의 농도가 1ppm이하로 떨어질 때의 농도분포를 파악하였다. 단, 유량, 본류 및 지류의 다른 오염물질의 유입, 팔당댐에서 방류 후 도달시간은 정체된 오염물질과 같은 조건이다. 종확산계수는 50m<sup>2</sup>/s, 횡확산계수는 종확산계수의 1/20로 고정하였다. 그림 3.3은 오염물질이 잠실대교 부근에서 유입된 최초 농도분포이다. 그림 3.4는 오염물질 유입 후 1시간 후 2000cms를 방류했을 때 약 122시간 후의 오염물질의 농도분포를 나타내고 있다.



그림 3.3 순간적으로 유입된 오염물질의 최초 농도분포

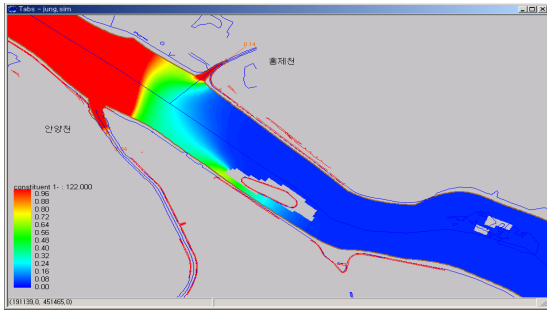


그림 3.4 성산대교부근에서 오염물질의 농도분포(2000cms, 122시간후)

하천에 순간적으로 유입된 오염물질은 댐 방류량에 따른 플리싱 효과를 예측할 수 있었으며, 댐 방류량이 클수록 오염물질의 도달시간이 빨라지고 플리싱 효과가 커지는 것으로 나타났다. 유입된 오염물질은 안양천과 홍제천으로 모두 유입되었다가 본류의 농도가 낮아지면 본류로 재 유입되는 것으로 계산되었다. 선유도 좌안의 경우 하폭이 좁고 유속이 느리기 때문에 오염물질이 선유도 우안보다 정체시간이 길고 농도가 높은 것을 알 수 있다.

#### 4. 비교 및 고찰

그림 4.1은 성산대교 부근에서의 정체된 오염물질의 120시간후 농도를 비교하였다. 좌우안의 농도분포가 다르게 나타난 것은 우안에 홍제천이 존재하고 약 500m 하류 좌안에 안양천이 존재하고 있기 때문에 지류의 위치와 유입유량에 의해서 횡방향 농도 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 또한, 댐 방류량이 증가함에 따라 플리싱 효과가 증가하는 규모를 파악 할 수 있다.

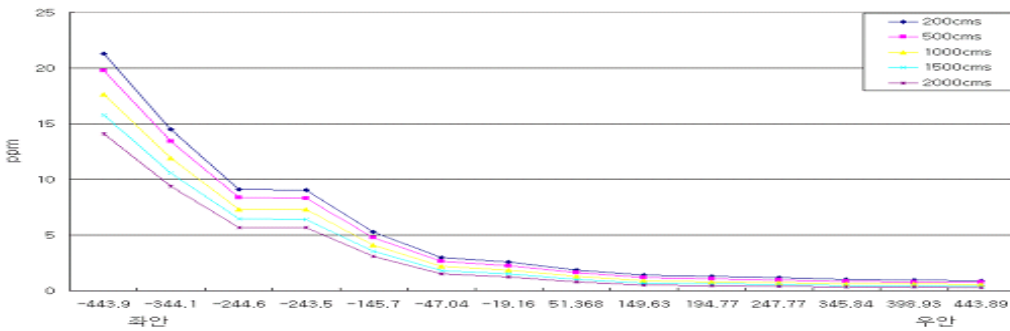


그림 4.1 성산대교 부근에서 댐방류량에 따른 정체된 오염물질 농도비교(120시간후)

그림 4.2는 성산대교 부근에서 122시간 후 댐 방류량에 따른 농도를 비교하여 도시하였다. 정체된 오염물질의 횡단면 농도분포와는 다른 양상을 보이는 것을 알 수 있으나, 댐 방류량이 클수록 농도의 회석정도가 큰 것을 알 수 있다.

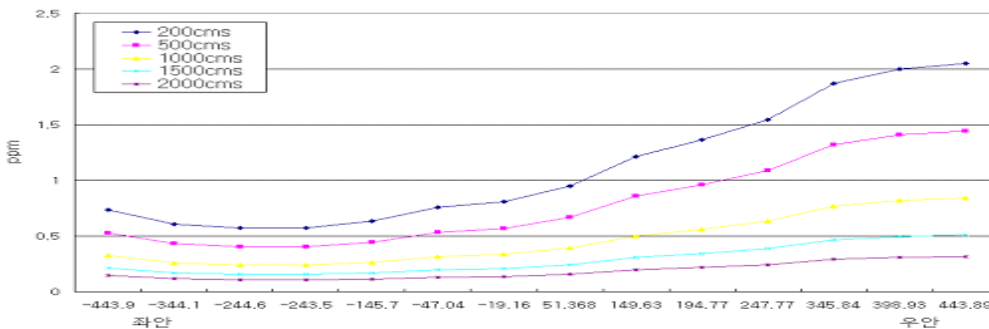


그림 4.2 성산대교 부근에서 댐방류량에 따른 순간적으로 유입된 오염물질의 농도비교(122시간후)

그림 4.3은 성산대교 부근에서 댐 방류량에 의한 오염물질의 농도가 1ppm에 도달하는 시간을 도시하였다. 정체된 오염물질의 경우 댐 방류량이 2000cms가 약 122 시간 후에 1ppm으로 농도가 희석되었으며, 200cms는 약 129 시간 후 1ppm으로 희석되는 것으로 나타으며, 시간차는 약 7시간 정도로 추정된다.

순간 유입된 오염물질의 경우 댐 방류량 2000cms가 약 115 시간 이후에 1ppm이하로 희석이 되며, 200cms는 약 123시간이후에 1ppm이하로 오염물질의 농도가 희석되는 것으로 나타났으며 시간 차이는 약 8 시간 정도이며, 댐 방류량에 대한 희석시간은 정체된 오염물질의 경우와 같이 선형적인 관계를 나타내고 있다.

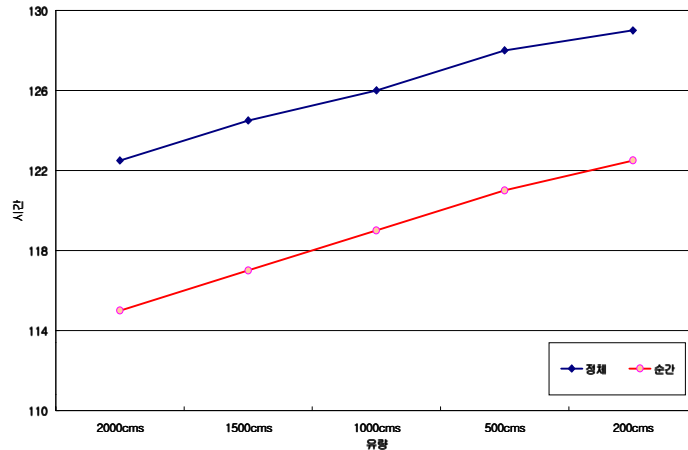


그림 4.3 성산대교부근에서 댐 방류량에 의한 오염물질농도가 1ppm을 나타내는 시간과 유량

## 5. 결론

본 연구에서는 댐 방류를 이용하여 하천에 정체된 오염물질과 순간 유입된 오염물질의 플러싱의 효과를 연구하기 위하여 RMA-4 모형을 한강하류부에 적용하였다. 순간적으로 유입된 오염물질과 정체되어 있는 오염물질은 댐 방류량이 증가할수록 희석시간이 단축되는 것을 알 수 있었고, 댐 방류량과 희석 시간이 선형관계가 있는 것으로 계산되었다. 댐 방류량에 의한 플러싱을 시도할 경우에는 본류의 오염물질이 지류로 역류하는 범위를 파악하여야 하며, 지류의 위치와 유입유량에 따라 횡방향 농도 차이를 고려해야한다.

## 참 고 문 헌

1. 서울시정개발연구원(1999). *잠실 상수원의 유입오염물질 조사 및 관리 연구*.
2. 한국수자원공사(1993). *댐 방류량이 하천 수질에 미치는 영향에 관한 연구*.
3. 고재형, 류택희, 한정석, 윤세의(2002). "한강하류부에서의 순간 투여된 오염물질의 확산." *한국도시방재학회 학술발표대회 논문집*, pp. 207-212
4. John E. E, Edward M. B and Venkat S. K (1996). "Modeling flushing and mixing in a deep estuary." *Water, Air and Soil Pollution* 102, pp. 345-353, 1998
5. Walter D. and Jërg I. (1996). "Flushing criteria in estuarine and laboratory experiments." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122 No. 12, pp. 728-734.
6. P. K. Dinesh Kumar, R. V. Sarma and M. D. Zingde (1999). "Freshwater flushing time scales of the Vashishti estuary, west coast of India." *Intern. J. Environ. Studies*, 1999, Vol. 56, pp. 313-323.
7. Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., and Brook, N. H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, New York, N. Y.
8. Michael H., Fiachra G., Roger F. and Mark F. (2002). "Flushing study assessment of a tidally active coastal embayment." *Advances in Environmental Research*, 7, pp. 847-857