

하천에 순간적으로 유입된 오염물질의 플러싱 효과 분석

An Analysis of Flushing Effects for Instantaneous
Contaminants Input into River

정재욱* / 김수열** / 김진영*** / 윤세의****

Jung, Jae Wook / Kim, Soo Youl / Kim, Jin Young / Yoon, Sei Eui

Abstract

This study had been performed to analyze flushing effects for instantaneous contaminants input with changing dam discharge in River. RMA-2 and RMA-4 models were applied to the downstream part of the Han River(from Jamsil submerged weir to Singok submerged one). The longitudinal dispersion coefficient of $50\text{m}^2/\text{s}$ was used. The four cases of dam discharges were selected as $500\text{m}^3/\text{s}$, $1000\text{m}^3/\text{s}$, $1500\text{m}^3/\text{s}$ and $2000\text{m}^3/\text{s}$, respectively, for 1 hour. The drought flow was fixed $200\text{m}^3/\text{s}$ in the Han River. The arrival time and the concentration of contaminant, the area of dispersion were estimated with RMA-4 model in the downstream part of the Han River. The arrival time which the concentration of contaminants become under 1ppm was analyzed with the stagnant and the instantaneous inflow contaminant at the section of Sungsan Bridge. The more increasing a dam discharge, the more short a dilution time of contaminant. The relation between the dam discharge and dilution time shows linearity. The instantaneous contaminant input was sensitively affected by the dam discharge than the stagnant contaminant one in the river. If it is tried to flush with a temporally increased dam discharge, it should be understood the range of overflowed contaminant dispersion from main channel to tributary channel.

Key words : flushing, contaminants, dispersion coefficient, instantaneous input

요 지

본 연구에서는 갈수시 하천에 순간적으로 유입되는 오염물질에 대해 댐방류량 변화에 따른 플러싱 효과를 분석하였다. 한강하류부(잠실수중보~신곡수중보)에 RMA-2 및 RMA-4 모형을 적용하였으며, 유로특성을 반영할 수 있도록 종확산계수는 $50\text{m}^2/\text{s}$ 을 사용하였다. 댐방류량은 1시간동안 $500\text{m}^3/\text{s}$, $1000\text{m}^3/\text{s}$, $1500\text{m}^3/\text{s}$, $2000\text{m}^3/\text{s}$ 로 변화시켰으며, 갈수시 유량은 $200\text{m}^3/\text{s}$ 로 고정하였다. 정체되어 있는 경우와 순간적으로 유입되는 경우, 성산대교 부근에서 농도가 1ppm 이하로 떨어지는 시간을 각 유량별로 분석하였다. 댐방류량이 증가할수록 희석시간이 단축되는 것을 알 수 있었고, 댐방류량과 희석시간이 선형관계가 있는 것으로 나타났다. 순간적으로 유입된 오염물질이 정체된 오염물질의 경우보다 댐방류량에 민감하게 영향을 받으며, 댐방류량에 의한 플러싱을 시도할 경우에는 본류의 오염물질이 지류로 역류하는 범위를 파악할 수 있었다.

핵심용어 : 플러싱, 오염물질, 확산계수, 순간유입

* 정회원, 부천대학 토목과 강사 (jwj645@msn.com)

** DPRI, Kyoto university, Coastal and offshore disaster division, Doctorate course

*** 정회원, 행정자치부 지역균형발전과장

**** 정회원, 경기대학교 토목·환경공학부 교수

1. 서론

한강은 오랜 기간에 걸쳐 시민의 상수원 및 수자원으로 이용되어 왔으며, 한강을 중심으로 수도권내 인구가 증가하고 경제 성장에 따른 공장용지의 증가와 더불어 지역개발사업의 추진과 주택보급에 따른 도시화 및 상수도 보급률의 확대에 따라 용수수요의 지속적 증가 등은 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. John 등(1996)은 깊은 Alaska의 깊은 하구의 플러싱양과 회석량을 결정하기 위해서 실측과 3차원 동수역학 이송 모형을 이용하였다. Walter Debler 등(1996)은 칠레의 Valdivia 하구에서 실측과 실험을 통하여 하천 바닥의 염수를 세척하기 위하여 밀도 프르드수의 범위를 연구하였고, Dinesh Kumar 등(1999)은 인도 서해안의 Vashishti 하구에서 조수의 영향과 하천유입유량에 의한 염수의 플러싱 시간 규모를 연구하였다. 국내의 경우, 서울시정개발연구원(1999)은 댐 방류량의 변동에 따른 WASP5 모형을 이용하여 한강 조류 농도의 플러싱 효과를 연구하였다. 하지만, 갈수기 하천에 순간적으로 유입된 또는 정체된 오염물질의 거동특성에 많은 영향을 주는 합리적인 확산계수를 이용한 플러싱 효과의 연구는 매우 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 한강하류부의 흐름특성 및 오염물질 거동 특성을 파악하기 위하여 RMA-2 및 RMA-4 모형을 한강하류부에 적용하였다. 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 취수장의 오염을 최소화하거나 빠르게 대처할 수 있도록 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 기본이론

RMA-2 지배방정식은 3차원 Navier-Stokes 방정식

을 수심방향으로 적분한 2차원 천수방정식이며, 연속 방정식과 운동량 방정식으로서 식 (1)~(3)와 같다.

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

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

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

여기서 h는 수심, u, v는 수심방향의 평균유속, ϵ_{xx} , ϵ_{yy} 는 x, y 방향의 난류교환계수, a는 하상고, n은 Manning의 조도계수, ξ 는 풍력전단계수, V_a 는 풍속, ψ 는 풍향, ω 는 지구의 회전각속도, Φ 는 국지 위도이다. RMA-4 모형의 지배방정식은 비압축성 난류 전단 흐름에서 보존물질에 대하여 수심방향으로 적분한 2차원 이송-확산 방정식으로 식(4)와 같다.

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

여기서, C는 오염물질의 농도, E_x , E_y 는 각각 x, y 방향의 확산계수, σ 는 오염물질의 생성 또는 소멸항, k는 오염물질의 감소계수를 나타낸다.

3. 적용구간의 흐름특성

3.1 수리·수문 현황

한강하류부는 주로 팔당 방류량의 변화에 따라 주로 변화하게 되며, 국지적으로 강우량 유입지천 및 물리적 조건 변화를 조래하는 외부의 일정 성분 유입에 따라 변한다. 수질에 미치는 영향은 방류량이 많아지면 편차는 있으나 대체적으로 회석효과를 나타내어 오염물질 함량을 다소 낮추는 효과를 나타낸다. 비교적 영향이 큰 부분은 수리조건에 미치는 영향이라고 볼 수 있다. 최근 팔당댐의 평균 방류량은 1998년 713m³/s, 1999년 620m³/s, 2000년 485m³/s로서 6~8월에 집중되었으며,

수리 및 수질인자 측정 년도인 1998년의 1~4월, 9~12월의 평균 방류량은 238m³/s로 조사되었다.

한강 하류부는 조위의 영향을 크게 받고 있는 구간으로서 상류로부터 유하되어 오는 하천 유량보다는 조위의 상태에 따라 거의 수리 특성이 결정되어진다. 조위에 의해 영향을 받는 구간은 거의 잠실수중보 부근까지 이르고 있으며 수치모의시 조수의 역상시에는 유속 vector가 상류측으로 나타나고 있다. 하도내에서 유속이 감소하는 구간에서는 퇴적과 함께 수질오염이 심화되므로 적절한 유속확보가 중요하다.

적용 구간(잠실수중보~신곡수중보)의 토지이용 정도를 보면 잠실수중보로부터 성산대교 구간까지의 유역은 수로변에 연하여 공장과 주택이 산재하고 있는 인구 밀집지이며 대부분 대지형태로 구성되어 있고, 성산대교 하류부 유역은 공장지대, 주거지, 임야가 부분적으로 산재하고 있기는 하나 대부분은 농경지로 이용되고 있다. 또한, 일산 신도시 부근의 많은 농경지가 주거지로 개발, 이용되고 있어 앞으로도 농경지 감소 및 주거지 증가현상은 계속될 것으로 예상된다.

3.2 입력자료 및 경계조건

하상자료 및 경계조건을 구축하기 위하여 잠실수중보로부터 신곡수중보 상단까지의 약 40km 구간을 선정하였다. 잠실수중보는 평시에는 자유 월류하나 홍수시에는 수중보가 되는 반면, 하류부의 신곡수중보는 평시에도 보의 마루가 수면 아래로 자주 잠기는 전형적인 수중보이다. 이 구간에는 3개의 섬과 3개의 만곡부가 위치하고 있으며, 평균 저수로 폭이 850m, 평균 수심이 약 4.6m이다. 하상자료는 한강수로 조사용역보고서(한강관리사업소, 2001)를 기본으로 하였고, 1/25,000의 수치지도를 이용하였다. 적용 하천 구간 내에서는

탄천, 중랑천, 안양천, 홍제천, 창릉천 등 5개 지류유입을 고려하였으며, 적용구간에 구성된 유한요소망은 그림 1과 같다.

댐 방류량의 변화에 따른 오염물질의 거동을 분석하기 위해서 RMA-2의 유량 조건을 500m³/s, 1000m³/s, 1500m³/s, 2000m³/s의 4가지 경우를 가정하였으며, 갈수시의 유량은 200m³/s로 고정하였다. 오염물질 유입 후 1시간 이후에 1시간동안 댐 방류량이 증가하는 것으로 가정하여 유황을 분석하였다.

또한, 오염물질의 이송·확산과정을 해석하는 과정에서 외국에서 개발된 모형을 국내 하천에 적용하기 위한 입력자료는 수계의 유로특성에 따라 결정되어야 함에도 몇몇 인자 외에는 외국의 하천을 대상으로 하여 만든 실험식으로부터 산정된 계수 값을 그대로 사용하고 있다. 특히 국내에서 확산계수에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 하천에서 오염물질의 거동 특성을 파악하는데 있어 가장 중요한 요소는 합리적인 확산계수의 산정이다. 일반적으로 갈수기에 일정하게 하천으로 유입되는 오염물질의 상태를 연속 유입조건으로 가정하면 갈수시의 오염물질의 거동은 확산계수의 영향이 미비하다. 그러나, 하천에 오염물질이 순간적으로 유입되었을 경우에는 확산계수의 크기에 따라 오염물질의 확산은 크게 달라진다.

일반적으로 중확산계수 산정에 이용되는 경험식 중 자연하천에 적용성이 크다고 발표된 경험식들을 한강 하류부에 적용하였다. 그림 2에서와 같이 한강하류부 단면의 중확산계수 값은 단면별, 경험식별로 차이가 나타나고 있으나 다소 과소추정된 Seyed M. Kashfipour등(2002)식을 제외하면 대체로 50m²/s 내외로 추정된다(윤세의, 2003).

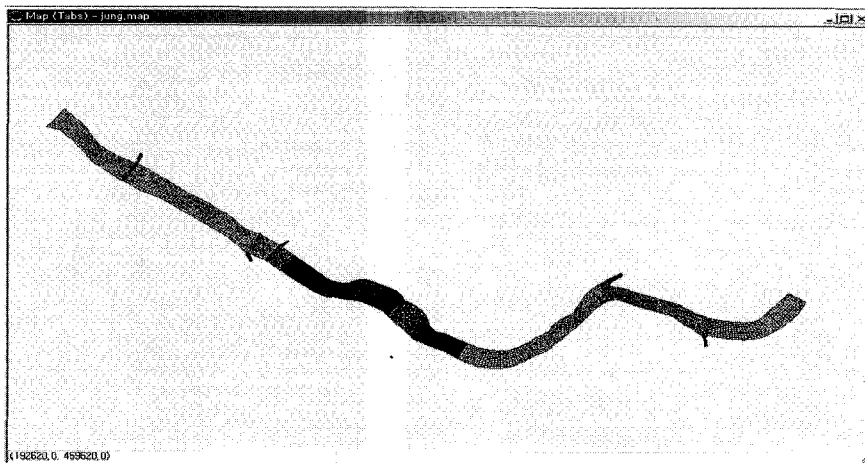
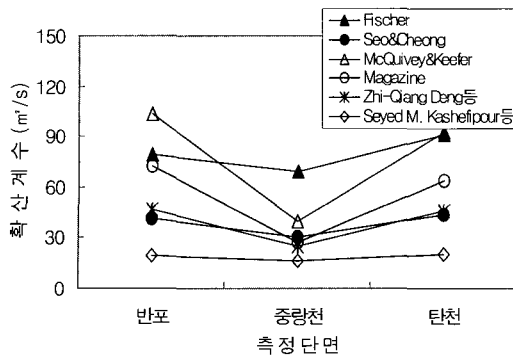
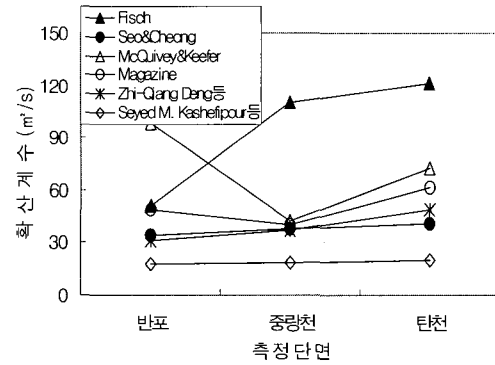


그림 1. 적용구간의 유한요소망



(a) 1998년



(b) 2000년

그림 2. 단면별, 경험식별 종확산계수

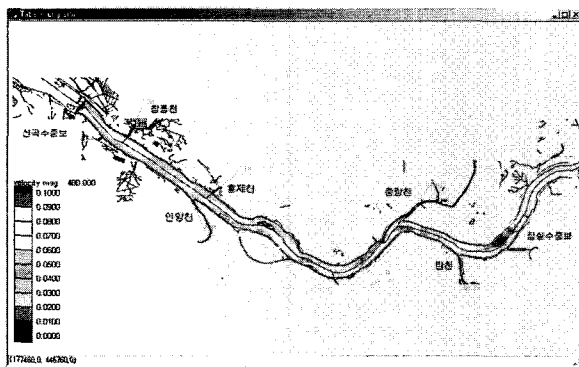


그림 3. 유량 200m³/s 의 유속 분포

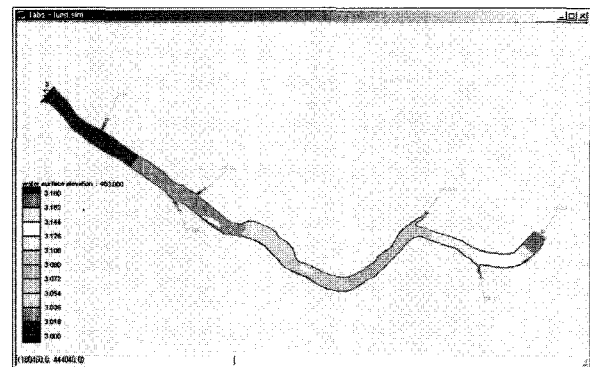


그림 4. 유량 200m³/s 의 수위 분포

본 연구에서 종확산계수는 50m²/s, 횡확산계수는 종확산계수의 1/20으로 고정하였으며(윤세의, 2003), 본 모형의 하류 경계조건인 신곡수중보의 수위는 인접 수위 관측소인 행주대교 수위를 적용하였으며, 감조현상은 고려하지 않았다.

3.3 흐름특성

그림 3~그림 4는 갈수량 200m³/s일때 하류단 평균수위를 적용한 유속 및 수위분포이다. 유속의 경우, 지형적인 특성변화에 따라 지류 합류부 지점에서 변화를 보이고 있으며, 평균 유속은 0.06-0.12m/s의 범위로 나타났다. 대상구간인 잠실수중보와 신곡수중보 사이의 수위차는 약 0.1m로 나타났으며, 전반적으로 수위는 3.1~3m로 완만한 경사를 이루고 있다.

4. 오염물질 방류량에 따른 거동분석

4.1 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 성산

대교 부근 단면 중앙 지점에서 오염물질의 농도가 1ppm이하로 떨어질 때의 농도분포를 파악하였다. 단, 갈수시 유량은 200m³/s로 동일하며, 본류 및 지류의 오염물질의 유입은 없다고 가정하였다. 최초 오염물질의 정체수역은 한남대교와 반포대교 중간 지점으로 그림 5와 같다.

그림 6은 정체되어 있는 오염물질에 200m³/s를 방류했을 때 약 120시간 후의 성산대교 부근의 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.

4.2 순간적으로 유입된 오염물질

갈수기 하천에 순간적으로 유입된 오염물질의 거동 분석을 하기 위해서 잠실대교 부근에서 800,000ppm의 농도를 가진 오염물질이 30분간 유입 하였을 경우 1시간 뒤 댐방류량을 각각 200m³/s, 500m³/s, 1000m³/s,

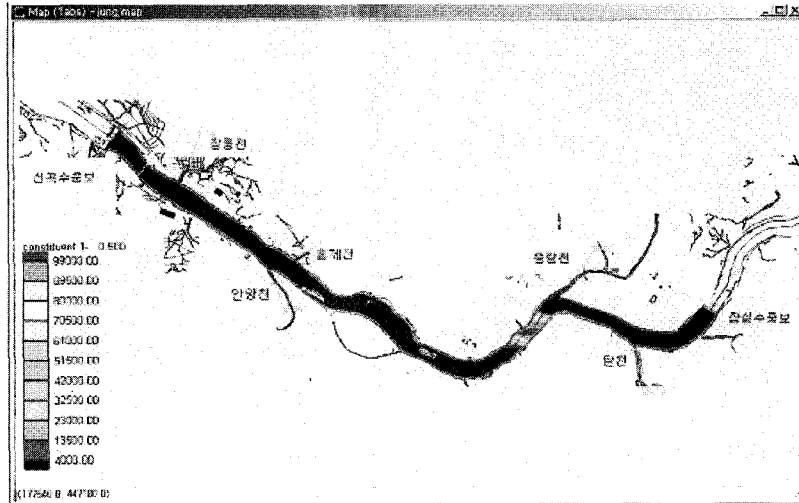


그림 5. 정체된 오염물질의 최초 농도분포

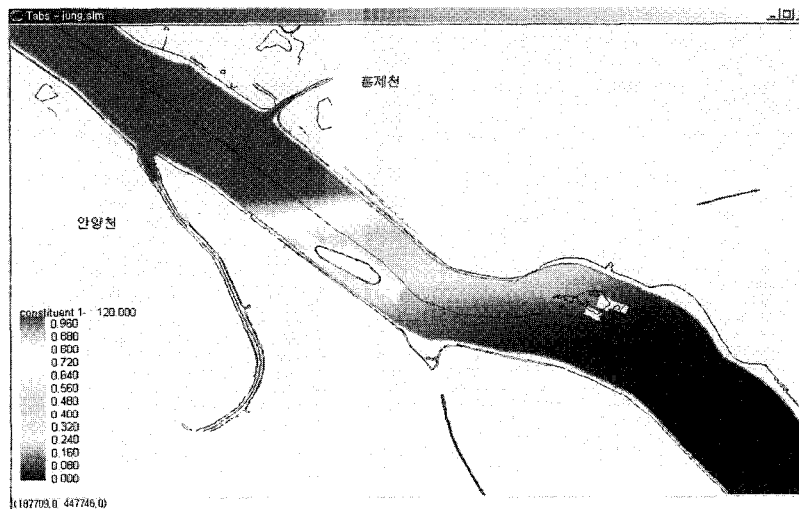


그림 6. 오염물질의 농도분포 (200m³/s, 120시간후)

1500m³/s, 2000m³/s를 한시간 동안 방류하여 성산대교 부근 단면 중앙 지점에서 오염물질의 농도가 1ppm 이하로 떨어질때의 농도분포를 파악하였다. 단, 유량은 200m³/s로 동일하며, 본류 및 지류의 다른 오염물질의 유입은 없다고 가정하였고, 팔당댐에서 방류 후 도달시간은 무시하였다. 종확산계수는 50m²/s, 횡확산계수는 종확산계수의 1/20로 고정하였다. 그림 7은 오염물질이 잠실대교 부근에서 유입된 최초 농도분포이다.

그림 8은 각각 오염물질 유입 후 1시간 후 200m³/s, 500m³/s, 1000m³/s, 1500m³/s, 2000m³/s 방류했을때 약 122시간 후의 오염물질의 농도분포를 나타내고 있다. 약 122시간후 30분간 유입된 800,000ppm의 오염물질이 희석되어 성산대교 부근에서 1ppm 이하로 떨어지는 것을 볼 수 있다.

하천에 순간적으로 유입된 오염물질은 댐방류량에

따라서 희석효과를 나타냈으며, 댐방류량이 클수록 오염물질의 도달시간이 빨라지고 희석량이 커지는 것으로 나타났다. 순간적으로 유입된 오염물질 역시 안양천과 홍제천으로 모두 유입되었다가 본류의 농도가 낮아지면 본류로 재 유입되는 것으로 나타났다. 선유도 좌안의 경우 하폭이 좁고 유속이 느리기 때문에 오염물질이 선유도 우안보다 정체시간이 길고 농도가 높은 것을 알 수 있다.

그림 9와 같이 228시간 후 1ppm 이상의 농도를 가진 오염물질 분포가 한강하류부의 선곡수중보를 지나간 것을 알 수 있으며, 댐방류량이 증가할수록 오염물질의 희석 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 정체된 오염물질과 마찬가지로 창릉천에 유입된 오염물질이 본류의 농도가 낮아지면서 본류로 재 유입되는 것으로 나타났다.

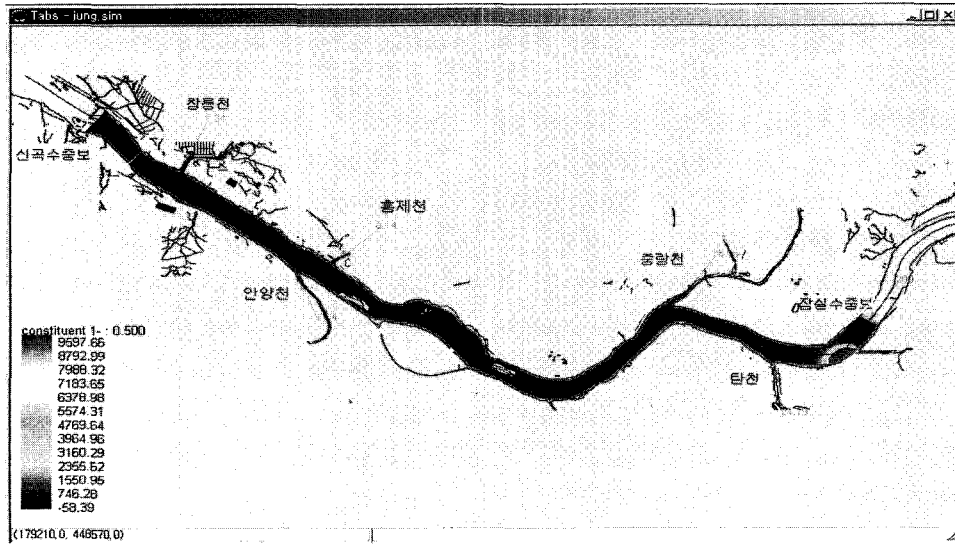
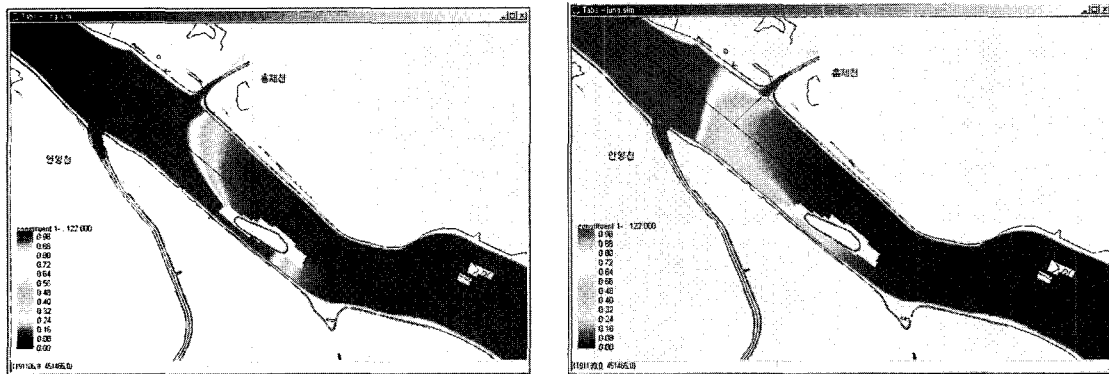


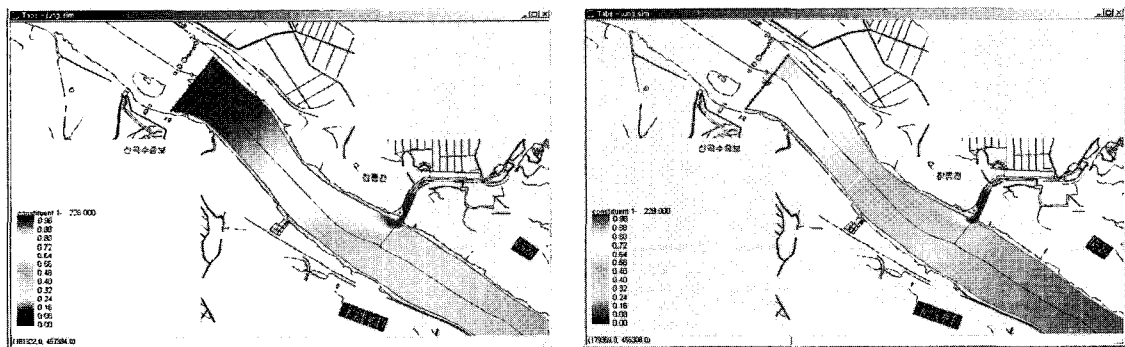
그림 7. 순간적으로 유입된 오염물질의 최초 농도분포



(a) 200m³/s

(b) 2000m³/s

그림 8. 성산대교부근에서 오염물질의 농도분포(122시간 후)



(a) 200m³/s

(b) 2000m³/s

그림 9. 신곡수중보 부근에서 오염물질의 농도분포(228시간후)

5. 비교 및 고찰

그림 10은 성산대교 부근에서의 정체된 오염물질의

120시간후 농도를 비교하였다. 좌우안의 농도분포가 다르게 나타난 것은 우안에 홍제천이 존재하고 약 500m 하류 좌안에 안양천이 존재하고 있기 때문에 지

류의 위치와 유입유량에 의해서 횡방향 농도 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 또한, 댐 방류량이 증가함에 따라 플러싱 효과가 증가하는 규모를 파악 할 수 있다.

그림 11은 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 희석정도가 큰 것을 알 수 있다.

그림 12는 성산대교 부근에서 댐 방류량에 의한 오염물질의 농도가 1ppm에 도달하는 시간을 도시하였다. 정체된 오염물질의 경우 댐 방류량이 2000m³/s 약 122 시간 후에 1ppm으로 농도가 희석되었으며, 200m³/s는 약 129 시간 후 1ppm으로 희석되는 것으로 나타으며, 시간차는 약 7시간 정도로 추정된다.

순간 유입된 오염물질의 경우 댐 방류량 2000m³/s

가 약 115 시간 이후에 1ppm이하로 희석이 되며, 200m³/s는 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.

6. 결론

본 연구에서는 한강하류부의 흐름 및 오염물질의 거동 특성을 파악하기 위하여 RMA-2 및 RMA-4 모형을 적용하였다. 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.

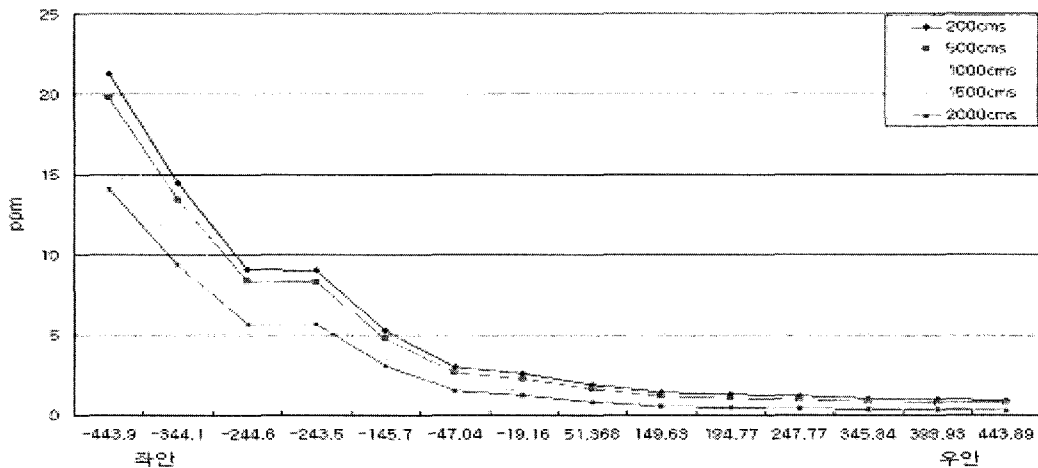


그림 10. 성산대교 부근에서 댐방류량에 따른 정체된 오염물질 농도비교(120시간후)

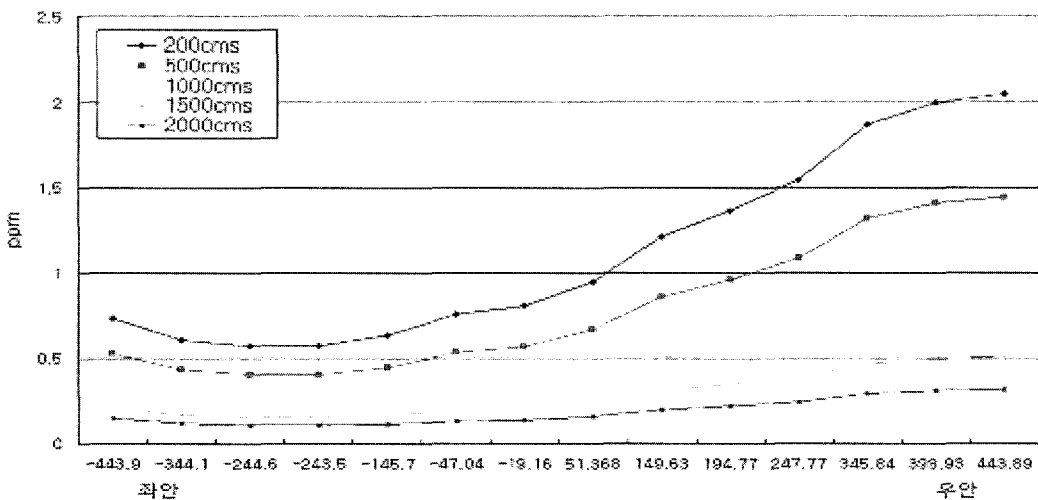


그림 11. 성산대교 부근에서 댐방류량에 따른 순간적으로 유입된 오염물질의 농도비교(122시간후)

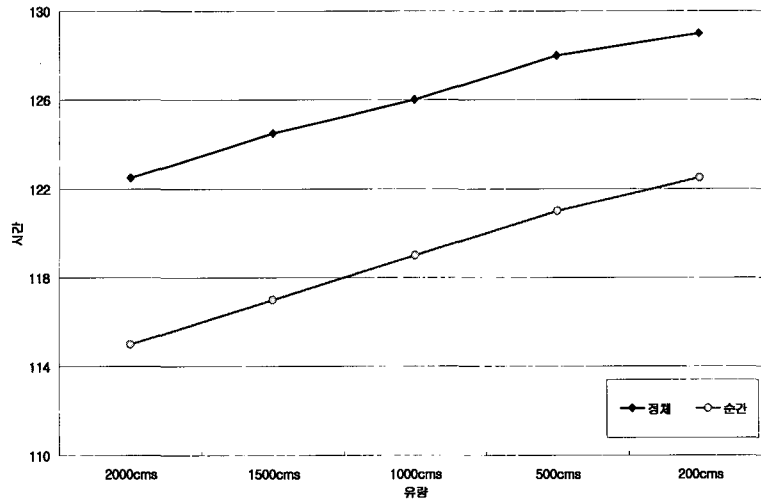


그림 12. 댐 방류량에 의한 오염물질 농도가 1ppm을 나타내는 시간과 유량

순간적으로 유입된 오염물질과 정제되어 있는 오염물질은 댐 방류량이 증가할수록 회석시간이 단축되었고, 댐 방류량과 회석 시간이 선형관계가 있는 것으로 나타났다. 댐 방류량에 의한 플러싱을 시도할 경우에는 본류의 오염물질이 지류로 역류하는 범위를 파악하여야 하며, 지류의 위치와 유입유량에 따라 횡방향 농도 차이를 고려해야 한다.

참 고 문 헌

서울시(1993). 한강하류부 수질보전 대책수립 보고서
 서울시정개발연구원(1999). 한강조류발생 방지대책 및 수질개선방안 연구.
 한강관리사업소(2001) 한강수로 조사용역 보고서
 윤세의, 고재형, 김수열 (2003). X 하천에 순간 유입된 오염물질의 거동 특성 분석X 한국수자원학회논문집 제36호, 제4권, pp.575-586
 고재형, 류택희, 김수열, 윤세의 (2002). X 한강하류부에서의 확산계수에 따른 오염물질 거동 특성 분석X 한국수자원학회 학술발표회 논문집(I), pp.389-393
 한정석, 이준호, 김정수, 윤세의 (2001).X 한강 하류부의

확산계수 추정, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 1449-1452

Dinesh Kumar, P. K., Sarma, R. V, and Zingde, M. D.(1999). "Freshwater flushing time scales of the Vashishti estuary, west coast of India." *Intern. J. Environ. Studies*, 1999, Vol. 56, pp. 313-323.

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: 345-353, 1998

Seyed M. Kashifipour, Roger A. Falconer (2002) "Longitudinal dispersion coefficients in natural channels." *WRI* 36, pp. 1596-1608.

Walter D. and Jërg I. (1996). "Flushing criteria in estuarine and laboratory experiments." *Journal of Hydraul Engineering*, ASCE, Vol. 122 No. 12, pp. 728-734.

- ◎ 논문접수일 : 2004년 8월 14일
- ◎ 심사의뢰일 : 2004년 8월 23일
- ◎ 심사완료일 : 2004년 9월 16일