

부정류 상태에서의 특성 오염물질 이송·확산예측에 관한 연구

(낙동강 본류를 중심으로)

A Study on the Prediction of Pollutant Advection and Dispersion in Unsteady Flow (Focusing on the Main Stream of Nakdong River)

이대회*, ○김중훈**, 윤용남**, 안홍천***

1. 서론

수자원 부족량은 한정되어 있는 반면 용수수요는 증가하고 하천수질은 점점 악화되고 있는 것이 현 시점의 우리나라 하천의 상황이다. 특히 낙동강에서 발생되었던 폐놀 오염사고와 암모니아성 질소 악취사건 등은 하천들이 항시 누출사고의 위협성에 직면하고 있다는 사실과 사고시 그에 따른 조치가 미흡하다는 사실을 보여주었다. 따라서 특성 오염물질의 누출사고에 대한 과학적인 분석과 이송·확산의 예측 및 신속 정확한 사후처리를 지원하기 위한 의사결정 지원 시스템의 개발과 현장보급이 필요하다.

본 연구는 수리해석모형과 수질해석모형을 연계하여 누출사고시 하류의 수질개선을 위하여 상류댐으로부터의 방류에 관한 의사결정 지원 시스템을 개발하기 위한 목적으로 시행되었으며, 실무에서 쉽게 적용할 수 있도록 GUI(Graphic User Interface)를 통한 윈도우용 프로그램의 개발도 병행되어졌다.

2. 낙동강 유역의 현황

2.1 대상수역의 선정

낙동강 본류를 중심으로 안동댐과 임하댐의 방류량이 만나는 지점 즉 반변천 합류점에서부터 월촌수위표 구간(유로연장 약 320km)을 선정하였다. 또한, 선정된 본류구간내의 지류중 내성천, 위천, 감천, 금호강, 황강, 남강, 밀양강의 7개 지류 및 비교적 취수량이 큰 구미, 대구, 칠서, 본포, 원동취수장의 취수량을 고려한 물수지 분석을 하였다. 낙동강 유역은 경제발전에 의한 산업화와 높은 인구밀도에 의해 수질오염이 심각한 실정이며, 특히 금호강 합류부 지점에 공단들이 밀집되어 있어 낙동강 하류부의 수질개선이 시급한 실정이다.

2.2 유역의 유황

본 연구에서는 낙동강 홍수통제소의 자기수위기록계를 포함한 수위기록자료를 수집하여 한국수자원공사에서 저수위를 위주로 일선교 왜관, 고령교, 적포교지점에 대해 작성한 수위-유량관계곡선 및 「전국 갈수분석 및 '94 가뭄심도의 분석」 연구를 위해 재작성된 낙동강 본류의 낙동, 왜관, 고령교, 진동, 삼랑진 수위표의 수위-유량관계곡선을 참고로 하여 유량을 환산하였다. 유량산정 시기는 극심한 갈수기를 나타냈던 '95년의 3월, 6월과 폐놀과 디칼로로메탄 수질사고를 적용시키기 위해 '91년 3월과 '94년 7월에 대해서이다.

3. 대상모형의 고찰

3.1 UNET 수리모형

UNET모형은 복잡한 하도망에 대해 부정류 계산을 수행하는 일차원 하천모형이다. 지배방정식을 선형화하여 해석하기 때문에 발산 가능성이 적어 안정성이 뛰어나다. 적용하고자 하는 하천 횡단면 및 하도의 갯수에 제한이 없으며, 수문, 여수로, 교량, 보 등 하천 구조물의 영향을 모두 해석할 수 있다. 복잡한 하도망에 많은 횡단면이 있는 경우의 흐름 해석에 효과적이다.

UNET모형의 기본식은 부정류해석에 이용되는 dynamic wave equation으로서 연속방정식과 운동방정식으로 구성된다.

* 현대건설 토목사업본부(국내)

** 고려대학교 토목환경공학과 교수

*** 한국수자원공사 수자원연구소 연구원

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(VQ)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f\right) = 0 \quad (2)$$

여기서 x 는 하도길이, g 는 중력가속도, t 는 시간, S_f 는 마찰경사, Q 는 유량, V 는 유속, A 는 단면적, S 는 저류량, q_l 는 단위 거리당 측방 유입량이다.

3.2 TOXI5 수질모형

TOXI5모형은 수질모형중에서 유독성 오염물질에 대한 이송·확산 분석을 수행하는 프로그램으로 WASP5모형의 부프로그램이다. 이 모형에서는 수체에 대해 독성물질의 거동과 상호반응에 대한 정상상태 혹은 동적상태의 모의가 가능하다. 대부분의 수질모형과 같이 WASP5모형의 기본식은 연속성과 물질수지 법칙이 이용되는 식 (3)과 같은 물수지 방정식이다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial(U_x A_x C)}{A_x \partial x} + \frac{\partial(E_x A_x \frac{\partial C}{\partial x})}{A_x \partial x} + S_L + S_B + S_K \quad (3)$$

여기서, C 는 수질항목의 농도(mg/ℓ), t 는 시간(day), U_x 는 종방향의 유속(m/day), A_x 는 통수단면적(m^2), E_x 는 종방향의 확산계수(m^2/day), S_L 는 외부로부터의 오염부하율($\text{mg}/\text{m}^3/\text{day}$), S_B 는 경계면으로부터의 오염부하율($\text{mg}/\text{m}^3/\text{day}$), S_K 는 수체내부의 동력학적 반응에 의한 총 변화율($\text{mg}/\text{m}^3/\text{day}$)이다.

3.3 모형의 연계방법

선정된 두 수리, 수질모형을 일괄적으로 연계모의하기 위해 두 모형이 상호 연결되도록 각각의 모형에 대해 source program을 수정하였다. TOXI5모형의 수질계산을 위해 UNET모형에서 마련해 주어야 하는 자료는 유량, 체적, 유속, 평균수리심 등이다. 준비되어 있는 단면이 많을수록 연계모형에 의한 결과치들의 정확도는 증가되며, 연계모형의 하천구성망의 비교는 그림 1과 같다.

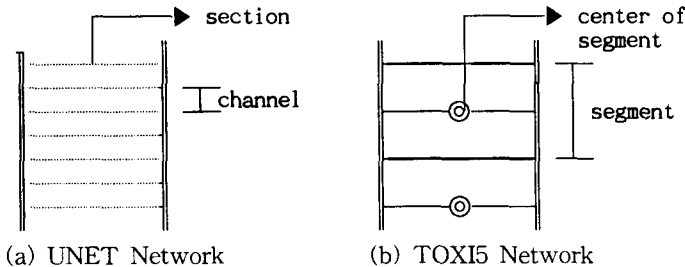


그림 1. UNET모형과 TOXI5모형의 하천구성망 비교

4. 수질예측모형의 적용

4.1 적용구간의 선정

모형의 적용구간으로는 낙동강유역의 본류구간은 안동 수위표에서 월촌수위표까지의 단면을 고려하였으며 지류구간은 황강의 합천댐부터 본류합류점까지와 남강의 남강댐부터 본류합류점까지의 단면을 고려하였다. 이 밖에도 내성천, 위천, 감천, 금호강, 밀양강의 본류구간으로의 유입과 취수장에서의 유량감소를 고려하였다. 적용구간의 모식도는 그림 2와 같다.

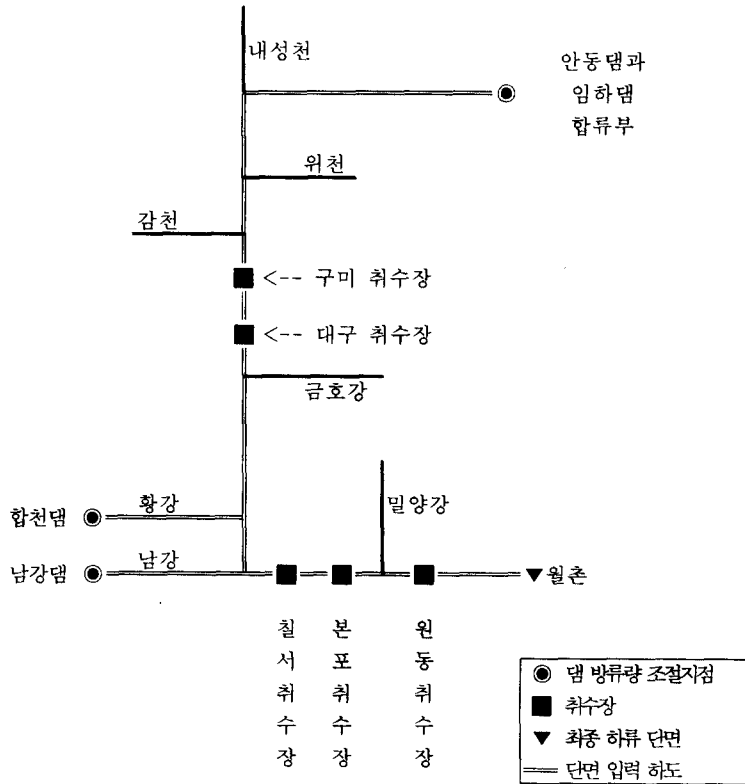


그림 2. 적용구간 모식도

4.2 댐 운영 결정을 위한 댐방류량 도달시간 검토

합천댐의 방류량이 황강하도를 거쳐 본류에 영향을 미치게 되는데 걸리는 시간은 대부분 1일 이하였으며, 남강댐의 경우는 도달시간이 2~3일로 합천댐에 비해 방류량이 본류에 도달하는데 많은 시간이 걸리는 것으로 나타났다. 남강댐 방류량의 도달시간이 합천댐에 비해 크게 나타나는 것은 남강의 유로연장이 황강보다 두배 가까이 길며 하천경사가 완만하기 때문이다.

4.3 누출사고시의 댐연계 운영효과의 평가

구미공단부근과 성서공단부근 중의 한군데에서 낙동강본류 유입부분에 임의의 독성유해물질이 6시간 동안에 3ton의 양이 유입되었다고 할 때, 누출된 오염물질에 대해서 보존성물질의 물리적 이송·확산과정만을 고려하여 '95년 3월의 유량자료에 표 1과 같은 11가지 경우에 따른 합천댐 및 남강댐의 추가방류로 인하여 금호강 유입부, 황강유입부와 칠서, 본포 및 원동취수장에서 시간별로 농도변화 과정을 모의 추적하여 수질사고시 오염농도의 변화와 댐 방류의 필요성 검토 및 희석효과의 평가 등을 위한 판단 근거를 제시하였다.

표 1. 누출사고시 댐연계 운영의 유형

방류유형	단기누출사고시 인근댐의 추가 방류량		방류유형	단기누출사고시 인근댐의 추가 방류량	
	합천댐	남강댐		합천댐	남강댐
	Case- 1	방류량 증가가 없는 경우		Case- 7	60
Case- 2	20	10	Case- 8	80	10
Case- 3	20	30	Case- 9	80	30
Case- 4	40	10	Case-10	100	10
Case- 5	40	30	Case-11	100	30
Case- 6	60	10			

표 2에는 표 1에 따른 방류유형에 대한 중요지점별 침투농도치와 그 발생시간을 독성물질 누출시를 시점으로 하여 나타내었다. 합천댐과 남강댐의 저수특성과 방류량의 본류에의 도달시간

등을 고려한 후, 방류유형을 선별하였으며 추가댐방류의 시기는 누출사고발생 직후로 설정하였다.

표 2. 방류유형에 따른 중요지점별 침투농도 및 발생시간

주요 지점 방류 유형	구미공단 누출사고시								성서공단 누출사고시							
	황강유입부		철서취수장		본포취수장		원동취수장		황강유입부		철서취수장		본포취수장		원동취수장	
	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)
Case-1	9.6	858	11.6	521	12.6	540	15.4	425	5.6	1070	7.5	644	8.7	673	11.4	518
Case-2	9.6	634	11.1	346	11.9	354	13.9	305	5.6	791	7.1	429	7.9	442	9.9	376
Case-3	9.6	634	11.1	283	11.8	288	13.5	256	5.6	791	7.1	350	7.8	359	9.5	316
Case-4	9.6	500	10.9	282	11.6	287	13.4	255	5.6	624	6.9	350	7.6	358	9.3	315
Case-5	9.6	500	10.9	238	11.5	242	13.1	219	5.6	624	6.8	296	7.5	301	9.1	271
Case-6	9.7	412	10.8	237	11.4	241	13.0	219	5.6	514	6.7	296	7.4	301	9.0	270
Case-7	9.7	412	10.8	205	11.4	208	12.8	192	5.6	514	6.7	255	7.4	259	8.8	237
Case-8	9.7	350	10.7	205	11.3	207	12.7	191	5.7	437	6.7	255	7.3	259	8.7	237
Case-9	9.7	350	10.7	181	11.3	182	12.6	170	5.7	437	6.7	224	7.3	227	8.6	211
Case-10	9.7	304	10.7	180	11.3	182	12.6	169	5.7	380	6.6	224	7.2	227	8.5	210
Case-11	9.7	304	10.7	161	11.2	162	12.5	152	5.7	380	6.6	200	7.2	203	8.4	189

표 2의 댐 연계운영의 유형중 Case-11에 대해서 추가 댐방류량의 시기를 변화시키면서 추가 댐방류 시기에 따른 중요지점별 침투농도와 누출사고를 시점으로 하여 침투농도가 발생되는데 걸리는 시간을 구해보았으며 그 결과는 표 3와 표 4에 나타내었다. 그림 3에는 구미공단에서의 누출사고시 8일후와 10일후 추가방류시의 농도변화를 비교하였다. (단, Seg103은 금호강합류부이고 Seg131은 황강합류부, Seg152는 철서취수장, Seg161은 본포취수장, Seg186은 원동취수장이다.) 최대한의 회석효과를 얻으면서 댐방류용량을 최소화하여 수자원의 낭비를 줄일 수 있는 댐방류시기는 구미공단 누출사고시는 누출사고 8일후이며, 성서공단 누출사고시는 4~5일후이다.

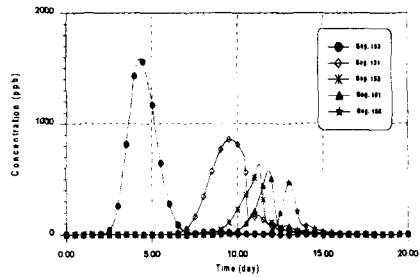
대상기간이 극심한 가뭄기였던 '95년 3월이었기에 오염물질이 이동하는 속도가 느리므로 추가 댐방류에 의한 회석효과를 얻을 수 있는 기간이 길다. 평상시에는 추가 댐방류에 의해 회석효과를 얻을 수 있는 시기가 앞당겨지며 기간도 짧아진다.

표 3. 추가 댐방류 시기에 따른 침투농도 및 발생시간 (구미공단누출)

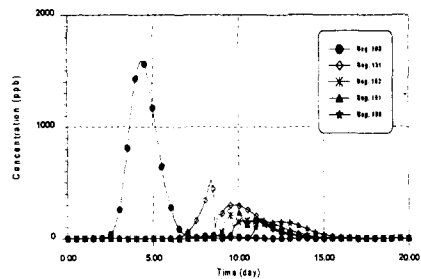
주요지점 누출사고후 방류시기	황강유입부		철서취수장		본포취수장		원동취수장	
	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)
6일후 추가방류	9.7	304	10.7	161	11.2	162	12.5	152
7일후 추가방류	9.7	304	10.7	161	11.2	162	12.5	152
8일후 추가방류	8.4	524	9.4	265	10.0	231	11.3	177
9일후 추가방류	9.4	851	10.3	562	10.9	485	12.2	375
10일후 추가방류	9.6	858	11.2	632	11.8	578	13.1	474
11일후 추가방류	9.6	858	11.6	521	12.4	533	13.8	472
12일후 추가방류	9.6	858	11.6	521	12.6	540	14.4	469

표 4. 추가 댐방류 시기에 따른 침투농도 및 발생시간 (성서공단누출)

주요지점 누출사고후 방류시기	황강유입부		철서취수장		본포취수장		원동취수장	
	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	시간 (day)	농도 ($\mu\text{g}/\ell$)
3일후 추가방류	5.7	380	6.6	200	7.2	203	8.4	189
4일후 추가방류	4.4	498	5.4	223	7.1	202	8.3	189
5일후 추가방류	5.4	1060	6.3	658	7.0	571	8.2	424
6일후 추가방류	5.6	1070	7.2	783	7.8	717	9.1	576
7일후 추가방류	5.6	1070	7.5	644	8.4	661	9.8	574
8일후 추가방류	5.6	1070	7.5	644	8.7	673	10.4	570
9일후 추가방류	5.6	1070	7.5	644	8.7	673	11.0	576



a) 8일후 추가방류



b) 10일후 추가방류

그림 3. 구미공단 누출사고시 댐운영에 따른 농도변화 (8일후와 10일후 추가방류)

5. 실제 누출사고 적용시 모형의 적합성 평가

5.1 폐놀 방류사고에 대한 해석

본 모형을 낙동강 수계에서 발생했던 폐놀 방류사고에 적용시켜 보았다. 이 구역에서 사고 발생 이전부터 예상되는 폐놀의 총 방류량은 37ton으로 추정되며 1일처리 한계를 넘는 1.7ton의 폐놀의 상단기간 동안 매일 낙동강으로 유입 것으로 추정된다. 이러한 양은 휘발 및 여러가지 감쇠요인에 의하여 상수 원수를 취수하는 지에 도달해서는 특별한 영향을 미치지 못하던 중, 3월 14일 22시에서 3월 15일 06시에 걸쳐 일시에 방류된 30ton의 폐놀의 상수원수에 심각한 영향을 주어 3월 16일 14시경 대구에서 주민신고가 발생하였다. 3월 17일 22시경 수질 조사반이 구성되어 3월 26일경까지 낙동강 수계에 대한 수질을 측정하였다.

폐놀 누출사고시 농도의 관측치들은 지속적으로 방류된 1.7ton/day의 폐놀에 의해 발생된 것으로 추정되므로, 이에 따른 폐놀방류유형을 입력하여 모의를 실시한 후 관측치와 비교하여 폐놀의 미지 반응계수들을 산정하였다. 그림 4는 최종적으로 산정된 반응계수들로 모의를 실시한 후, 안동수위표부터의 거리에 따른 폐놀농도 관측치와 계산치를 비교한 것이다.

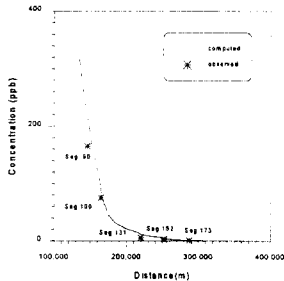


표 5. 폐놀 수질사고시 침투농도 및 시간의 추정

관측지점	수질모형의 Segment No.	침투시간 (days)	침투농도 ($\mu\text{g}/\ell$)
백관 수위표	90	5.60	12400
백천 수위표	100	6.60	2760
강정 취수장	102	6.80	2220
급호강 합류부	103	6.90	1690
황강 합류부	131	8.90	220
칠서 취수장	152	9.90	90
본포 취수장	161	10.60	70
원동 취수장	186	11.60	20

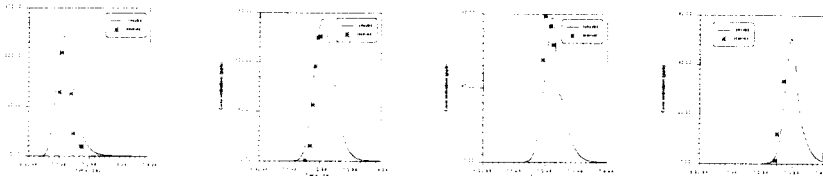
그림 4. 폐놀사고시 관측치-계산치 농도비교

주) 침투시간은 3월 10일 00시를 기준으로

5.2 디클로로메탄 방류사고에 대한 해석

본 모형을 낙동강 수계에서 발생했던 디클로로메탄 방류사고에 적용시켜 보았다. 디클로로메탄 방류사고는 '94년 6월 성서공단 복개천에서 용제, 압연유, 절삭유, 경유로 추정되는 기름유출에 의해 발생되었다. 유출량은 알려진 바 없으며, 악취가 많이 남으로써 사고발생을 인지할 수 있었다.

누출지점과 근접하게 위치하고 있는 사문진교, 달성취수장, 창녕밤숲의 농도자료를 중심으로 산정된 디클로로메탄 추정유입량은 1.75ton이다. 유입량을 산정한 후, 민감도 분석을 통해 디클로로메탄의 반응계수를 결정하였다. 지점별 관측농도와 모형의 모의에 의해 구한 계산치는 그림 5에서 비교하였다. 그림 6은 계산치와 실측치가 대체적으로 부합함을 보여주고 있다.(단, Seg115는 달성취수장이고 Seg130은 창녕밤숲, Seg134는 합천적포교, Seg152는 칠서남지교, Seg161은 본포취수장이다.) 또한 모형에 의한 계산이 신뢰할만한 결과치를 산출함으로, 모형을 이용하여 누출사고 당시의 댐방류에 의한 오염농도 희석효과를 평가해 보았다. 그 결과 댐의 추가방류가 오염농도의 저감에 거의 기여하지 못한 것으로 판단되었다.



a) 달성 취수장

b) 창녕밤숲

c) 합천적포교

d) 칠서남지교

그림 5. 디클로로메탄 사고시 관측치-계산치 농도비교

방류량이 본류에 도달하는데 14.3hrs가 걸리게 된다. 그러므로 댐의 추가방류를 오염물질이 황강유입부에 도달하기 14.3hrs 이전에는 시행하여야 최대한의 효과를 얻을 수 있다. 이와 같이 댐방류량이 오염물질보다 빨리 오염구간에 도달할 경우의 지점별 시간에 따른 농도변화는 그림 6과 같다.

표 6. 디클로로메탄 누출사고시 댐방류시기에 따른 침투농도

지점	댐방류를 하지 않았을 경우		실제와 같이 추가방류한 경우		방류시기가 적절할 경우	
	침투 시간 (day)	침투 농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	침투 시간 (day)	침투 농도 ($\mu\text{g}/\ell$)	침투 시간 (day)	침투 농도 ($\mu\text{g}/\ell$)
달성취수장	1.15	243	1.15	243	1.15	243
창녕밤샘	2.05	144	2.05	144	2.10	159
합천적포교	2.30	80	2.25	78	2.30	51
칠서남지교	3.16	49	2.96	51	3.01	31
본포취수장	3.91	34	3.61	33	3.66	24

주) 침투시간은 '94년 6월 30일 00시를 시점으로

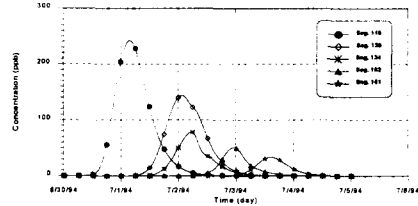


그림 6. 디클로로메탄 누출사고시 농도변화 (추가 댐방류한 실제상황)

5.3 실제 누출사고에 대해 갈수기 적용시 영향 검토

폐놀누출사고와 디클로로메탄 누출사고를 본 연구의 대상 갈수기인 '95년 3월의 상황에 적용시켜 보았다. 오염물질이 각 지점에 도달하는데 걸리는 시간은 실제 누출사고가 발생했던 시기보다 갈수기에 더 크지만 하류쪽의 침투농도는 오히려 적다. 이와 같은 결과는 폐놀과 디클로로메탄의 물리·화학적반응에 의한 감소율이 크기 때문에, 오염물질이 하류쪽으로 이동해가면서 농도가 감소해 가는 비율이 유량이 적음으로써 생기는 오염농도증대효과보다 크기 때문인 것으로 해석된다.

6. 결론

본 연구에서는 하도망에서의 부정류해석에 효과적인 UNET 수리모형과 독성오염물질에 대한 수질 예측모형인 TOXI5를 연계하여 낙동강을 대상으로 수질사고시 오염물질 회석효과를 얻기 위한 상류댐 방류의 근거를 제시하였다.

낙동강 유역은 국내의 어느 하천보다도 누출사고의 잠재적인 위험도가 높고 실제 여러차례에 걸쳐 누출사고가 발생하였다. 특히 갈수기의 누출사고는 오염농도가 크고 오염지속기간이 길기 때문에 평수기의 누출사고에 비해 그 피해가 크다. 갈수기의 오염사고시 낙동강 본류의 유량과 유속에 영향을 미치는 댐들에서의 추가방류로 오염수의 회석효과를 기대할 수 있다. 각 댐의 추가방류시, 댐의 추가방류가 낙동강 본류에 도달하는 시간 등을 고려할 때 황강 상류부에 위치한 합천댐을 위주로 하고 남강 상류부에 위치한 남강댐을 보조적으로 운영하는 것이 효율적이라 판단된다.

'91년 폐놀누출사고와 '94년 디클로로메탄 누출사고 등의 실제 누출사고에 모형을 적용시킨 결과 실측치와 유사한 결과치를 얻었다. 미흡하기는 하나, 과거의 실측된 자료를 바탕으로 모형에 입력되는 오염물질별 특성변수를 검정하여 누출사고시의 의사결정에 이용할 수 있게 되었으며, 계속해서 수리, 수질자료의 축적을 통해 수질항목별 반응계수를 보완, 개선해 나간다면 더욱 신뢰할만한 수질예측 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

7. 참고문헌

- 1) 건설부, "낙동강 하천정비 기본계획서", 1981, 1983, 1984, 1989, 1992, 1993, 1994.
- 2) 조흥연, 이길성, 한광석, "WASP4모형의 매개변수 추정 및 검증 -팔당호를 중심으로-", 한국수문학회, 제35회 수공학 연구 발표회 논문집, pp 491-500, 1993.7.
- 3) 한건연, "낙동강 유역에서의 독성오염물 배출에 따른 수질해석 모형의 개발", 연강재단, 1994.6.23. 한국수자원공사, "대하천에서의 오염물질 이송·확산예측과 저감대책에 관한 연구(1차년도) -낙동강 본류를 중심으로-", 1994.12.
- 4) 한국수자원공사, "대하천에서의 오염물질 이송·확산예측과 저감대책에 관한 연구(2차년도) -낙동강 본류를 중심으로-", 1995.12.
- 5) Ambrose, R.B., Jr., Wool, T.A., Connolly, J.P., and Schanz R.W., "WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model - Model Theory, Users Manual, and Programmer's Guide", EPA, EPA/600/3-87/039, 1988.1.
- 6) Smith R. H., "Development of a Flood Routing Model for Small Meandering Rivers", Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Missouri at Rolla, MO, 1978.
- 7) Thomann, R.V., and Mueller, J.A., "Principles of Surface Water Quality Modeling and Control", Harper & Row Publishers, Inc, 1987.
- 8) Robert L. Barkau, "UNET, One-Dimensional Unsteady Flow Through a Full Network of Open Channels", U.S.Army Corps of Engineers, 1993.3.