

갈수기 수질사고시 상류댐 장기방류효과 검토

Evaluation of Long-term Release Effect of Upstream Dams
for the Mitigation of Low Flow Water Quality Accident

김정환* 윤용남** 김중훈** 안홍천***

Kim, Jeong Hwan · Yoon, Yong Nam · Kim, Joong Hoon · Ahn, Hong Cheon

1. 서론

최근 인구의 도시 집중화와 내륙지방의 대규모 공단 조성으로 인하여 오·폐수 발생량은 증가하고 있으나 이를 적절히 관리하지 못하고 있어 많은 오·폐수가 하천에 유입되어 하천의 수질 오염을 가중시키고 있다. 특히, 갈수기에는 하천유량의 감소로 하천내 수질이 극도로 악화되며 하천에 유입되는 오염물질의 증가에 상대적으로 민감하게 된다. 본 연구의 목적은 낙동강에 있어서 이러한 수질문제의 해결을 위해 상류에 위치한 댐들의 방류량을 장기적으로 증가시킬 경우 하류의 수질개선에 얼마만큼의 효과를 가져올 수 있는지를 검토하는데 있다. 이를 위해 대부분의 수질 모형이 가지고 있는 수리모형의 취약성을 보완하여 정상류 상태의 수리계산에 가장 보편적으로 사용되는 HEC-2모형과 WASP5모형에서 수질모형인 EUTRO5모형을 하나의 프로그램으로 연계하여 모의를 수행하였으며, 이 수질예측모형에 쓰이는 반응계수들을 보정 검증하여 장기수질사고에 대한 모형의 적용성도 평가해 보고자 한다.

2. 대상수역

대상수역은 낙동강 본류를 중심으로 구미, 본포, 원동 취수장을 포함하도록 하였으며 정기적으로 수질측정이 실시되는 수질측정망을 포함하고 있는 안동댐과 임하댐 방류량의 합류부 지점 즉, 반변천 합류점에서부터 월촌수위표 구간(유로연장 약 320Km)을 선정하였다. 또한, 이 본류 구간내의 지류중 내성천, 위천, 감천, 금호강, 황강, 남강, 밀양강의 7개 지류유입 및 비교적 취수량이 큰 구미, 대구, 칠서, 본포, 원동취수장의 취수량을 고려하여 평수기 물수지를 계산하였으며, 그 대상수역의 유역도는 그림 1과 같다.

* 고려대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정

** 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

*** 한국수자원공사 수자원연구소 연구원

3. 현장 수질 및 유량조사

수질측정을 위한 시료채취의 대상지점은 낙동강 본류를 따라 수위표가 위치한 곳을 위주로 안동시 안동교에 위치한 안동수위표 지점에서부터 하류방향으로 낙동수위표, 왜관수위표, 고령교 수위표, 적포교수위표, 진동수위표, 삼랑진수위표 지점의 7개 지점을 선정하였으며 2차 현장 수질 측정시에는 금호강의 오염정도를 파악하기 위하여 금호강이 낙동강 본류에 유입되기 직전 지점인 강창교수위표 지점을 추가 포함시켰다. 또한, 수질모형의 적용을 위해서 필요한 수질측정지점 이외의 자료는 환경부의 수질측정망을 통한 수질자료를 이용하였으며 측정대상 수질 항목으로는 수온, pH, DO, 탁도, 대장균군수, BOD, COD, SS, T-N, T-P, ABS, 클로로필-a 등을 선정하였다. 수질 예측모형(EUTRO5)에서 모의되는 수질항목은 DO, BOD, 유기질소, NO₃-N, NH₃-N, 유기인, PO₄-P, 클로로필-a 등의 8개 항목으로 1995년 3월과 1995년 6월에 대한 입력자료와 반응계수 추정을 위한 검증자료는 표 1 및 표 2와 같다. 또한, 본 과업의 수질조사 대상기간은 10년에서 50년 빈도의 극심한 갈수기였으므로, 이 기간동안 관측된 수위는 수위-유량관계곡선을 이용하여 유량으로 환산하기에는 많은 무리가 있었다. 따라서 한국수자원공사에서 제공한 낙동강 본류구간에서의 물수지 관련자료를 이용하였으며, 표 3에서는 현장 수질측정기간인 3월과 6월에 대한 각 구간별 유량을 나타내고 있다.

표 1. 1995년 3월의 수질현황

수질 항목 수질 측정망	수온 (°C)	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	Org-N (mg/l)	NO ₃ -N (mg/l)	NH ₃ -N (mg/l)	Org-P (mg/l)	PO ₄ -P (mg/l)	CHL-a (μg/l)
내성천3	15.0	11.8	1.3	0.655	4.385	0.504	0.017	0.067	5.00
위천2	6.0	14.0	1.1	1.019	6.823	0.784	0.026	0.105	5.50
감천2	10.0	13.8	3.6	0.847	5.672	0.652	0.035	0.141	5.50
금호강6	10.0	9.8	9.9	4.036	2.983	14.038	0.039	0.779	74.00
황강3	6.3	10.0	0.9	1.817	4.014	0.583	0.015	0.119	5.00
남강4	10.0	5.6	4.0	0.500	2.699	0.320	0.028	0.225	20.00
밀양강3	10.0	6.7	6.9	0.000	2.717	0.543	0.021	0.086	20.00
월촌	9.0	7.2	4.0	0.668	2.514	3.182	0.011	0.042	150.00
안동	5.0	10.8	1.2	0.155	1.004	0.056	0.025	0.102	6.32
낙동	6.3	7.9	0.9	0.260	1.679	0.073	0.041	0.166	5.08
왜관	8.2	8.1	2.4	0.297	1.923	0.506	0.045	0.182	8.74
고령교	9.2	6.2	7.6	0.931	1.944	7.275	0.046	0.274	92.67
적포교	7.7	8.6	8.2	0.744	1.930	2.681	0.037	0.149	133.66
진동	7.5	7.7	8.5	0.652	2.354	1.967	0.041	0.164	188.90
삼랑진	7.1	8.9	8.3	0.675	2.200	2.285	0.037	0.146	155.50

표 2. 1995년 6월의 수질현황

수질 항목 수질 측정망	수온 (°C)	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	Org-N (mg/l)	NO ₃ -N (mg/l)	NH ₃ -N (mg/l)	Org-P (mg/l)	PO ₄ -P (mg/l)	CHL-a (μg/l)
내성천3	22.0	9.7	0.8	0.795	3.512	0.287	0.013	0.050	6.00
위천2	25.0	10.1	1.1	0.484	3.256	0.374	0.015	0.059	8.50
감천2	20.0	9.2	3.0	0.570	3.811	0.438	0.031	0.123	6.50
금호강6	21.8	3.7	6.0	2.144	1.585	5.183	0.189	0.566	60.56
황강3	20.9	12.6	0.8	0.879	2.582	0.346	0.002	0.003	6.00
남강4	21.0	8.0	4.6	0.524	2.827	0.335	0.245	0.163	25.00
밀양강3	23.0	9.8	3.3	0.000	3.029	0.606	0.352	0.235	25.00
월촌	23.0	8.5	3.7	1.153	4.339	0.366	0.163	0.326	50.00
안동	19.5	6.5	0.8	0.218	1.459	0.120	0.005	0.021	8.15
낙동	25.4	5.6	0.9	0.260	1.676	0.091	0.015	0.058	11.04
왜관	26.0	8.0	2.9	0.253	1.634	0.372	0.032	0.130	47.37
고령교	24.6	5.0	6.3	0.908	1.895	3.057	0.017	0.345	81.14
적포교	23.2	3.5	7.3	0.668	2.430	1.202	0.034	0.135	145.55
진동	22.9	3.5	3.7	0.515	1.860	0.128	0.057	0.057	116.53
삼랑진	25.6	2.4	2.8	0.483	1.574	0.112	0.039	0.079	53.27

4. 수질예측 연계모형의 개발

기존 수질예측모형들은 수리해석부분에서 대개 구간별 대표수리단면이 사용되어 실제 하천의 수리학적 특성을 제대로 반영하지 못한다고 판단되며, 이에 보다 향상된 낙동강유역에 적합한 모형의 개발을 위해 기존의 여러 수리해석모형 중 수리학적 모의결과가 수리특성 구현에 가장 적합하다고 판단되는 HEC-2모형과 WASP5모형중 수질모형인 EUTRO5모형의 기존 SOURCE 프로그램을 수정하여 두 모형이 하나의 프로그램으로 실행될 수 있도록 연계한 수질예측모형을 개발하였다. 연계모형에서 HEC-2모형의 입력자료는 조도계수, 하류부의 초기수심, 단면자료 및 물수지분



그림 1. 대상수역의 유역도

표 3. 물수지를 고려한 구간별 유량자료(3월, 6월)

구 간	유량(CMS)		지류 또는 취수장	유량(CMS)	
	3월	6월		3월	6월
안동 수위표~내성천 합류부	23.0	36.0	내성천	4.0	2.0
내성천 합류부~위천 합류부	27.0	38.0	위천	1.6	0.5
위천 합류부~감천 합류부	28.6	38.5	감천	3.7	1.5
감천 합류부~구미 취수장	32.3	40.0	구미취수장	-2.7	-3.0
구미 취수장~대구 취수장	29.6	37.0	대구취수장	-11.9	-11.9
대구 취수장~금호강 합류부	17.7	25.1	금호강	12.3	10.0
금호강 합류부~황강 합류부	30.0	35.1	황강	10.8	6.0
황강 합류부~남강 합류부	40.8	41.1	남강	16.5	25.5
남강 합류부~칠서 취수장	57.3	66.6	칠서취수장	-3.1	-3.3
칠서 취수장~본포 취수장	54.2	63.3	본포취수장	-2.3	-2.0
본포 취수장~밀양강 합류부	51.9	61.3	밀양강	2.3	2.4
밀양강 합류부~원동 취수장	54.2	63.7	원동취수장	-7.0	-4.1
원동 정수장~월촌 수위표	47.2	59.6			

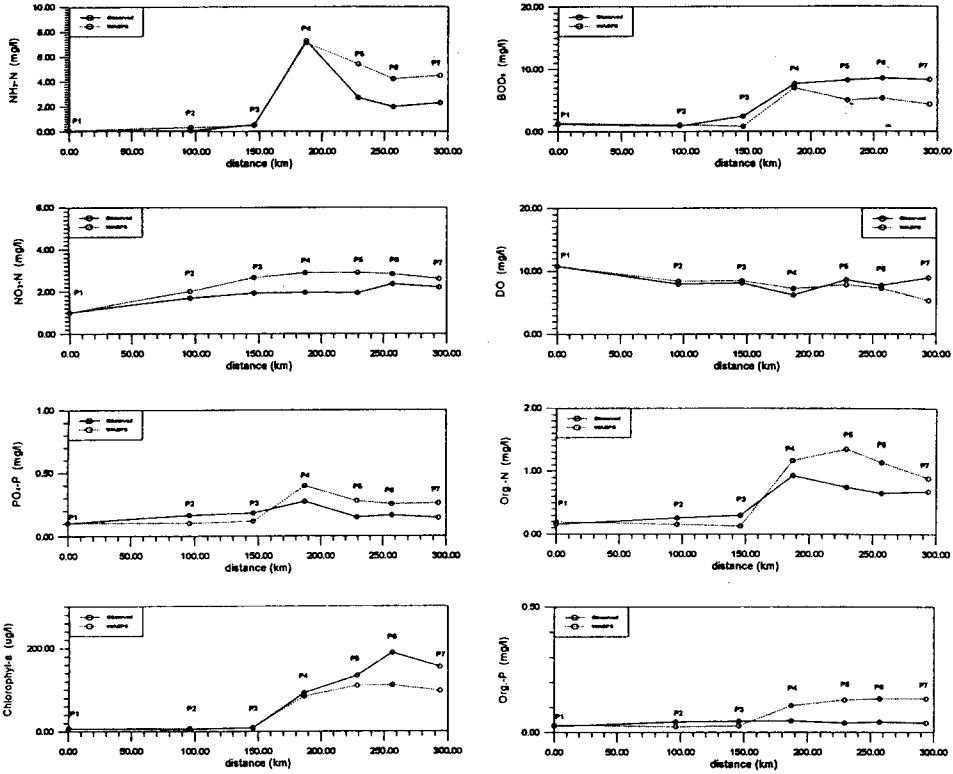
석을 통한 유량자료등이 필요하다. 따라서, 연계모형을 실행시키면 HEC-2모형의 입력파일 및 EUTRO5모형의 입력파일을 차례로 기입하도록 하는 명령이 나오고 입력파일이 기입되면, 먼저 HEC-2모형이 실행되어 여기에서 얻어진 수리결과(단면적, 유속, 유량, 수심, 수체체적)가 자동적으로 *.HYD 파일로 저장되게 된다. 다음에 EUTRO5모형이 실행될때, HEC-2모형의 실행결과에서 저장된 수리결과인 *.HYD 파일을 읽어들이어 EUTRO5모형에서 필요한 수리자료로 이용되고 이자료를 기본으로 하여 수질모형을 수행하게 되는데, 이러한 일련의 작업들이 하나의 연계 프로그램내에서 동시에 실행될 수 있도록 하였다.

5. 수질예측모형의 적용결과 및 분석

8개 예측수질항목들의 상호반응에 관여하는 반응계수로는 전체수질항목에 대해서 42개의 반응계수가 있지만, 민감도가 비교적 작은 항목은 모형에서 추천하는 값을 그대로 적용하였으며, 주요 반응계수에 관한 수치만을 표 4에 수록하였다. 주요 반응계수로는 DO와 BOD의 상호반응에 K1320C(질산화계수), K140C(탈질화계수), K1013C(유기질소의 가수분해율), KDC(탈산소계수), K2(재포기계수), SOD(하상퇴적물의 산소요구량)등 6개의 반응계수와 질소 순환요소들의 상호반응에 K1320C(질산화계수), K140C(탈질화계수), K1013C(유기질소의 가수분해율)등 3개의 반응계수, 인 순환요소들의 상호반응에 K58C(유기인의 가수분해율) 1개의 반응계수, 클로로필-a 에는 K1C(조류의 성장율) 1개의 반응계수가 관여하는데, 각 수질항목의 실측치에 근접한 모의치를 얻을 수 있도록 시행착오적으로 추정된 반응계수의 수는 여러 수질항목에 중복되는 반응계수를 제외하면 모두 8개가 된다. 반응계수 추정과정에서 본래 EUTRO5모형이 가지는 제약성인 전체 구간을 하나의 반응계수로 사용하는 문제를 해결하여 일부 반응계수(K1C, K140C, K1320C)에 대해서는 Segment별로 반응계수를 달리 부여할 수 있도록 하였으며 연계모형에 1995년 3월의 물수지분석 결과유량을 적용하여 그림 2와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

표 4. 연계모형의 주요 추정 반응계수값

반응 계수	추정 결과	문헌상의 범위	비 고
K1320C (day ⁻¹)	0.02~0.10	0.09~0.13	각 Segment별로 기입
K140C (day ⁻¹)	0.5~5.0	-	각 Segment별로 기입
K1013C (day ⁻¹)	1.50	-	-
K58C (day ⁻¹)	0.20	0.22	-
KDC (day ⁻¹)	0.50	0.16~0.21	-
K2 (day ⁻¹)	0.05	-	-
K1C (day ⁻¹)	2.0~480.0	-	각 Segment별로 기입
SOD (g/m ² /day)	0.4~2.0	0.2~4.0	각 Segment별로 기입



P1(안동), P2(낙동), P3(왜관), P4(고령교), P5(적포교), P6(진동), P7(삼랑진)

그림 2. 수질측점 위치별 농도변화(1995. 3)

6. 수질사고시 연계모형의 적용성 검토

DAMBRK모형을 이용하여 현재의 여러 방류량 조건에서 10CMS씩 단계별로 추가방류시켜 낙동강 본류유역에 도달되는 시간을 검토한 결과, 합천댐과 남강댐에서 10CMS~120CMS정도의 유량을 추가로 방류시켰을 때, 유량에 따라 다소 차이는 있었으나 합천댐의 경우 1일 정도 남강댐의 경우 2~3일 정도의 시간이 소요됨을 알 수 있었다. 또한, 본 연구에서 개발한 연계모형이 수리해석부분에서는 정상류모형이므로 단기수질사고보다는 장기수질사고 대응프로그램으로 더욱 적절하다고 판단되며, 1995년 3월의 본류구간 유량에 금호강 유입부에서 암모니아성 질소가 임의로 100 ton/day의 양으로 20일 동안 계속해서 유입되었다고 가정할 때 누출된 오염물질에 대해 물리

적인 이송·확산과정뿐만 아니라 추정반응계수를 사용하여 화학적 또는 생물학적 순환과정을 고려하여 1995년 3월의 유량자료에 표 5와 같이 19가지 경우의 수에 따른 안동댐 및 합천댐, 남강댐의 추가방류로 인한 금호강 유입부, 황강 유입부, 남강유입부, 칠서취수장, 본포취수장, 원동취수장에서 시간별로 농도변화 과정을 모의 추적하여 수질사고시 오염농도의 변화와 댐 방류의 필요성 검토 및 희석효과의 평가등을 위한 판단 근거를 제시하였으며, 표 6에서는 Case별 방류유형에 따른 중요지점별 침투농도치와 그 발생시간을 보여주고 있다.

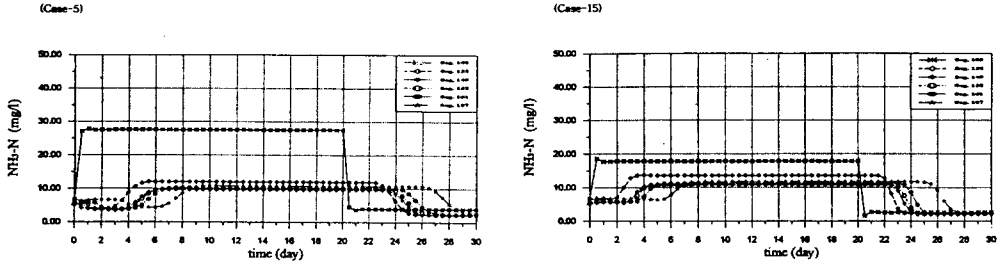
표 5. 수질사고시 방류유형

방류유형	누출사고시 인근댐의 추가 방류량 (m ³ /sec)		
	안동댐	합천댐	남강댐
CASE-1	방류량 증가가 없을 경우		
CASE-2	20	20	10
CASE-3	20	20	20
CASE-4	20	60	10
CASE-5	20	60	20
CASE-6	20	100	10
CASE-7	20	100	20
CASE-8	40	20	10
CASE-9	40	20	20
CASE-10	40	60	10
CASE-11	40	60	20
CASE-12	40	100	10
CASE-13	40	100	20
CASE-14	60	20	10
CASE-15	60	20	20
CASE-16	60	60	10
CASE-17	60	60	20
CASE-18	60	100	10
CASE-19	60	100	20

표 6. 방류유형에 따른 중요지점별 침투농도 발생시간 및 침투농도

중요 지점 방류 유형	황강유입부		남강유입부		칠서취수장		본포취수장		원동취수장	
	시간 (day)	농도 (mg/l)	시간 (day)	농도 (mg/l)	시간 (day)	농도 (mg/l)	시간 (day)	농도 (mg/l)	시간 (day)	농도 (mg/l)
CASE-1	10.5	31.1	12.0	22.2	13.5	23.5	14.5	24.6	20.5	27.1
CASE-2	6.0	17.6	7.0	13.5	7.5	14.0	8.0	14.4	11.5	15.2
CASE-3	6.0	17.6	7.0	12.4	7.5	12.8	8.0	13.1	11.0	13.9
CASE-4	5.5	12.0	6.5	10.2	7.0	10.5	7.5	10.8	10.0	11.5
CASE-5	5.5	12.0	6.5	9.58	7.0	9.86	7.5	10.2	10.0	10.7
CASE-6	6.0	9.20	6.5	8.27	7.0	8.51	7.5	8.81	9.0	9.37
CASE-7	6.0	9.20	6.5	7.86	7.0	8.09	7.5	8.37	9.0	8.90
CASE-8	4.5	15.5	5.5	12.5	6.0	12.8	6.5	13.2	9.5	13.8
CASE-9	4.5	15.5	5.5	11.6	6.0	11.9	6.5	12.2	9.5	12.8
CASE-10	4.5	11.3	5.5	9.80	5.5	10.1	6.5	10.4	8.0	10.9
CASE-11	4.5	11.3	5.5	9.27	5.5	9.51	6.5	9.78	8.0	10.3
CASE-12	4.5	8.90	5.0	8.13	5.5	8.35	6.0	8.61	8.0	9.13
CASE-13	4.5	8.95	5.0	7.76	5.5	7.98	6.0	8.23	8.0	8.71
CASE-14	4.0	13.7	4.5	11.4	5.0	11.6	5.5	11.9	9.0	12.5
CASE-15	4.0	13.7	4.5	10.7	5.0	10.9	5.5	11.2	8.5	11.7
CASE-16	4.0	10.4	4.5	9.22	5.0	9.43	5.5	9.69	7.5	10.2
CASE-17	4.0	10.4	4.5	8.77	5.0	8.96	5.5	9.19	7.0	9.66
CASE-18	3.5	8.46	4.0	7.72	4.5	7.98	5.0	8.20	7.0	8.69
CASE-19	3.5	8.46	4.0	7.41	4.5	7.66	5.0	7.89	7.0	8.33

표 5에서보면 Case-4와 Case-14가 3개 댐에서의 총 추가 방류량이 90CMS로 서로 같으며 또한, Case-5와 Case-15가 100CMS, Case-6과 Case-16이 130CMS, Case-7과 Case-17이 140CMS로 총 추가방류량이 같음을 알 수 있고, 댐 연계운영에서 총방류량이 동일하더라도 안동댐과 같은 본류 상류부에서의 방류가 상대적으로 클 때, 본류부에서 유속이 빨라지므로 하류부 임의의 지점에서 침투농도치는 커지고 침투농도치 도달시간은 다소 빨라져서 수질사고의 영향을 다소 단축시킬 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 남강댐에서의 추가 방류는 저수용량을 감안할 때 한계가 있으므로 이와 같은 장기수질사고의 경우 댐 연계운영은 안동댐과 합천댐의 2개 댐을 주요 대상으로 해야 하며, 주요 취수장이 하류부에 밀집되어 있으므로 취수장에서 침투농도치가 다소 높더라도 수질사고의 영향을 단축시키기 위해서는 안동댐의 방류를 늘리는 것이 바람직하고 이와 반대로 취수장에서의 수질사고 영향이 다소 길어지더라도 침투농도치를 줄이기 위해서는 합천댐에서의 방류량을 늘리는 방향으로 댐 연계운영을 실시하는 것이 타당하다 하겠다.



Sep103(금호강유입부), Seg132(황강유입부), Seg149(남강유입부), Seg152(철서취수장), Seg161(본포취수장), Seg187(원동취수장)

그림 3. 수질사고시 시간에 따른 유해물질 농도변화(총방류량 100CMS)

7. 결론

본 연구에서는 낙동강 본류의 주요구간을 대상으로 수질예측모형의 검증용 위한 수질 및 유량자료의 수집, 측정 및 분석을 시행하였고 낙동강 본류를 모의 대상으로 수리모의모형(HEC-2)과 수질예측모형(EUTRO5)을 연계 결합시킨 수질예측 연계모형을 개발하여 수질사고시 연계모형의 적용성을 검토한 결과 정상류모형인 연계프로그램은 장기간의 수질사고로 인한 유해물질의 농도 변화에 대한 회석효과 고려시 상류댐 방류로 인한 수질개선효과의 모델링에 유용함을 알 수 있었다. 댐들의 저수용량을 감안할 때 댐 연계운영은 안동댐과 합천댐의 2개 댐을 위주로 해야 할 것으로 판단되며, 연계모형의 모의 결과 상류댐 방류에 의한 각 취수장에서의 침투농도치와 침투 농도치 도달시간 예측이 가능하였다.

8. 참고문헌

1. 건설부 (1981,1983,1984,1989,1992,1993). “낙동강 하천정비 기본계획서.”
2. 김중훈 등 (1994). “대하천에서의 오염물질 이송·확산예측과 저감대책에 관한 연구(1차년도) : 낙동강 본류를 중심으로.” 연구보고서, 수자원연구소 WRRI-WS-94-7, 한국수자원공사.
3. 우효섭 등 (1995). “'94 낙동강 수질사고시 댐방류 효과 검토.” 연구보고서, 건기연-95-WE-2, 한국건설기술연구원.
4. 조홍연, 전경수, 이길성, 한광석 (1993). “WASP4 모형의 매개변수 추정 : 팔당호를 중심으로.” 대한토목학회논문집, 제13권, 제4호, pp. 177-188.
5. 한국건설기술연구원 (1992). “하천 유량자료의 계산.”
6. Ambrose, R.B., Jr., Wool, T.A., Connolly, J.P., and Schanz R.W. (1987). “WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model-Model Theory, Users Manual, and Programmer's Guide”,EPA/600 /3-87/039, EPA.
7. Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H. (1979). “Mixing in Inland and Coastal Waters”, Academic Press, Inc.
8. Hydrologic Engineering Center(1990). “HEC-2 Water Surface Profiles, User's Manual”, U.S. Army Corps of Engineers.