

하천에서의 오염물질 이송·확산 예측

-낙동강 본류를 중심으로-

○김정환*, 윤용남**

1. 서론

평상시 갈수기에 자연하천에서의 수질변화와 오염물질의 이송·확산과정은 수리 및 수문학적 특성을 나타내는 각종 수문인자의 변화, 생화학적 반응, 오염원의 분포상태, 수로의 기하학적 특성 등과 같은 여러 인자에 의하여 영향을 받게 되므로 수질예측의 신뢰도를 높이기 위해서는 이러한 세밀한 부분에 더 많은 연구 노력이 필요하다. 현재까지 국내에서 사용되고 있는 대표적인 수질예측모형을 살펴보면 Streeter-Phelps가 용존산소의 평형방정식을 발표한 이래 개발된 QUAL2E모형, WASP5모형 등을 들 수 있으며 예측 수질항목이나 해석 목적에 따라 여러 하천 및 호소에 사용되어 그 적용성이 검토된 바 있다. 본 연구에서는 먼저 정상류 모형인 HEC-2모형과 수질예측모형인 WASP5모형 중 수질예측부분의 EUTRO5모형을 기본으로 수정작업을 통한 연계모형을 구성하여 낙동강의 주요지점별로 현장수질측정 자료와 비교하여 적용성을 평가하였으며, 지금까지의 기존 수질예측모형으로는 잘 설명되지 못하는 저류대(storage zone)효과 및 비보존성 오염물질의 손실율을 포괄적으로 고려한 별도의 프로그램을 개발하여 과거에 실제 발생했던 수질사고 사례와 비교하여 그 적용성을 검토하였다. 적용 대상 수질사고는 '94년 6월 30일부터 7월초까지 낙동강 수계 취수장에 연쇄적인 취수중단사태를 빚게 했던 낙동강 디클로로메탄 오염사건으로, 이는 옥외 저장탱크에서 집수조로 통과하는 관을 절단하여 고농도의 유기화합물이 함유된 다량의 폐유원액을 방류시킴으로써 발생하였다.

2. 연계 수질예측모형의 개발

현재 널리 사용되고 있는 QUAL2E모형 및 WASP5모형과 같은 대개의 수질예측모형들은 모형 자체내에서 계산된 수리해석 결과가 수질모형의 입력자료로 사용되는 Uncoupled 모형이다. 하도 구간별로 직사각형이나 사다리꼴로 형상화된 대표단면을 통해 구해진 수리해석 결과를 사용하는 것이 보통이며, 이와같이 계산된 수리해석 결과가 실제 하천의 수리학적 특성을 제대로 반영한다고 보기는 어렵다. 따라서, 기존의 여러 수리해석모형 중 수리학적 모의결과가 수리특성 구현에 비교적 적합하다고 판단되는 HEC-2모형과 수질예측모형 중 동적모의가 가능한 WASP5모형과의 연계를 시도하였다.

* 유일엔지니어링 부설 연구소 연구실장

** 고려대학교 토목환경공학과 교수

본 연구에서는 정상류 수리해석모형인 HEC-2모형과 WASP5모형 중 수질모의부분인 EUTRO5모형의 기존 Source 프로그램을 수정하여 이들 두 모형이 하나의 프로그램 안에서 실행될 수 있도록 연계한 수질예측모형을 개발하였다. 연계 프로그램의 수행으로 기존 수질예측모형이 가지는 수리해석 결과의 취약성을 다소나마 해결할 수 있을 것으로 사료되며, 실제 낙동강 유역을 대상으로 그 적용성을 검토하였다. 연계모형에 있어서 수리해석부분인 HEC-2모형의 입력자료는 조도계수, 하류부의 초기수심, 단면자료 및 유량자료 등이며, 수질예측부분인 EUTRO5모형의 입력자료는 수리해석자료, 경계조건, 수질항목의 반응계수 등이다. 이에 개발된 연계모형을 실행시키면 HEC-2모형의 입력화일 및 EUTRO5모형의 입력화일을 차례로 입력하도록 하는 명령이 나오고 2개 모형에 대한 입력파일이 입력되면, 먼저 HEC-2모형이 실행되고 여기에서 얻어진 수리결과(단면적, 유속, 유량, 수심, 수체체적)가 자동적으로 *.HYD 화일로 저장되게 된다. 다음에 EUTRO5모형이 실행될 때, HEC-2모형의 실행결과에서 저장된 수리결과인 *.HYD 화일을 읽어들이고 EUTRO5모형에서 필요한 수리자료로 이용된다. 이렇게 얻어진 자료와 수질모형의 입력자료를 기본으로 수질모의를 수행하게 되는데, 이러한 일련의 작업들이 하나의 연계 프로그램내에서 동시에 실행될 수 있도록 하였다.

3. 대상수역에서의 유출계산 및 현장수질조사

대상수역의 평수기 유출계산에서 수역내 수위표의 기존 수위-유량 관계곡선식은 홍수기 위주로 작성되어 있어 본 연구의 대상인 평상시 갈수기 유출산정에는 무리가 있었다. '95년 3월 및 6월에 시행한 현장수질측정 지점에서의 수위-유량 관계는 낙동강홍수통제소의 자료를 통해서 얻을 수 있었지만, 극심한 갈수로 인하여 해당 수위에 대한 수위-유량 관계곡선의 적용에 문제가 있었고 이 정도의 저수위 자료는 수위-유량 관계곡선식의 적용 한계를 벗어났다. 따라서, 본 연구에서는 한국수자원공사에 작성한 '95년 3월 및 6월에 대한 지류유입 및 취수장의 취수량을 포함한 물수지분석 결과를 사용하였으며, 그 결과는 표 1에 나타나 있다.

표 1. 구간별 유량자료('95년)

구 간	본류유량(CMS)		지류 또는 취수장(정수장)	지류유입량, 취수량(CMS)	
	3월	6월		3월	6월
안 동 수위표~내성천 합류부	23.0	36.0			
내성천 합류부~위 천 합류부	27.0	38.0	내 성 천	4.0	2.0
위 천 합류부~감 천 합류부	28.6	38.5	위 천	1.6	0.5
감 천 합류부~구 미 취수장	32.3	40.0	감 천	3.7	1.5
구 미 취수장~대 구 취수장	29.6	37.0	구미취수장	-2.7	-3.0
대 구 취수장~금호강 합류부	17.7	25.1	대구취수장	-11.9	-11.9
금호강 합류부~황 강 합류부	30.0	35.1	금 호 강	12.3	10.0
황 강 합류부~남 강 합류부	40.8	41.1	황 강	10.8	6.0
남 강 합류부~칠 서 취수장	57.3	66.6	남 강	16.5	25.5
칠 서 취수장~본 포 취수장	54.2	63.3	칠서취수장	-3.1	-3.3
본 포 취수장~밀양강 합류부	51.9	61.3	본포취수장	-2.3	-2.0
밀양강 합류부~원 동 취수장	54.2	63.7	밀 양 강	2.3	2.4
원 동 취수장~월 춘 수위표	47.2	59.6	원동취수장	-7.0	-4.1

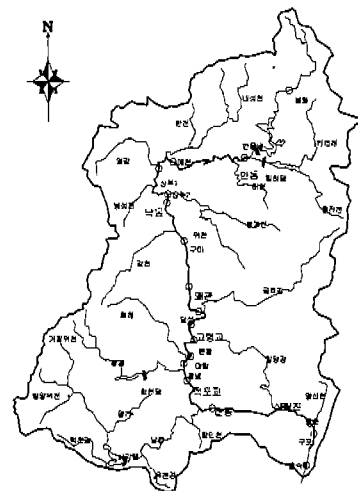


그림 1. 현장 수질시료 채취지점

수질측정을 위한 시료채취의 대상지점은 낙동강 본류를 중심으로 수위표가 위치한 곳을 위주로 안동시 안동교에 위치하는 안동수위표 지점에서부터 하류방향으로 낙동수위표, 왜관수위표, 고령교수위표, 적포교수위표, 진동수위표, 삼랑진수위표 지점의 7개 지점을 선정하였으며, 2차 현장 수질측정시에는 금호강의 오염정도를 파악하기 위하여 금호강이 낙동강 본류에 유입되기 직전 지점인 강창교수위표 지점을 추가 포함시켰다. 그림 1은 현장 수질시료 채취지점을 나타내며, 수질모형의 적용을 위해서 필요한 수질측정지점 이외의 자료는 환경부의 수질측정망을 통한 수질자료를 이용하였다. 측정대상 수질항목으로는 수온, pH, DO, 탁도, 대장균수, BOD, COD, SS, T-N(NH₃-N, NO₃-N), T-P, ABS, 클로로필-a 등을 선정하였으며, 특히 클로로필-a의 성장과 소멸은 하천내 T-N과 T-P의 증감과 관련하여 중요한 인자가 되므로 측정항목에 추가 포함시켰다.

표 2. '95년 3월의 수질현황

수질 항목 수질 측정 장	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
밀촌	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	135.66
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 3. '95년 6월의 수질현황

수질 항목 수질 측정 장	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
밀촌	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

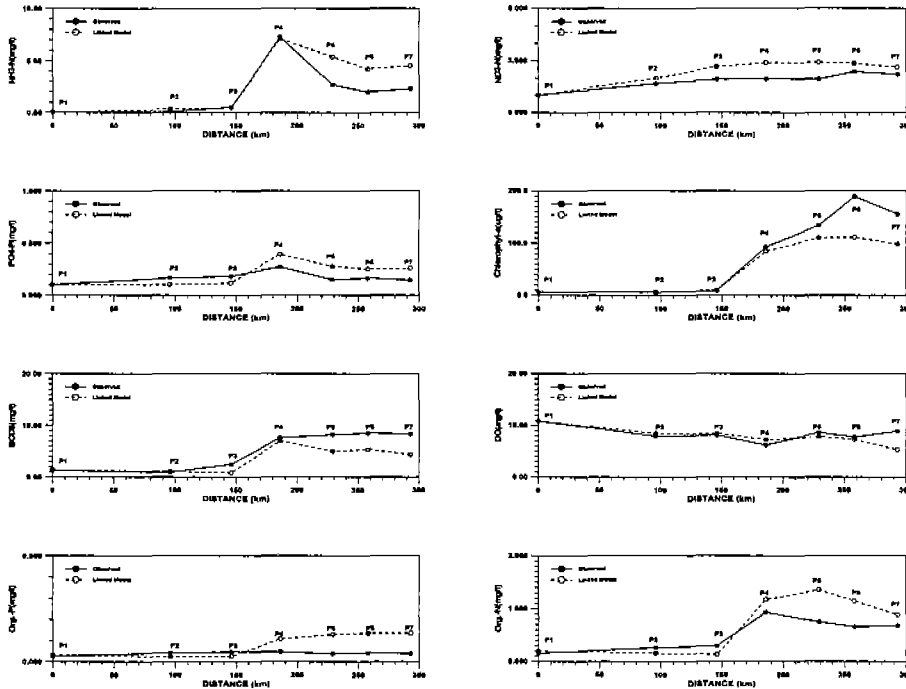
4. 연계 수질예측모형의 적용결과

모형의 적용구간으로는 낙동강유역의 본류구간 중 안동댐과 임하댐 합류부지점 즉, 반변천 합류부에서 월촌수위표까지의 유로연장 320km 구간이며 단면자료는 낙동강본류에 속하는 781개 단면을 이용하여 Segment를 191개로 재구성하였다. HEC-2모형의 실행결과 각 단면에서 산정된 유속, 수체체적, 수심, 단면적 등의 수리결과가 EUTRO5모형에서 수리자료로 사용될 수 있도록 191개 Segment에 포함되는 단면번호를 파악하여 Segment별 수리자료를 재산정하고 이 자료가 바로 EUTRO5모형의 수리자료로 입력될 수 있도록 하였다. 최종 결정된 예측수질항목은 NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P, 클로로필-a, BOD, DO, Organic-N, Organic-P 등 8개 항목이다. 이들 8개 예측 수질항목들의 상호반응에 관여하는 반응계수로는 전체수질항목에 대해서 42개의 반응계수가 있지만, 민감도가 비교적 작은 항목은 모형에서 추천하는 값을 그대로 적용하였으며, 주요 반응계수에 관한 수치만을 표 4에 수록하였다. 반응계수 추정과정에서 본래 EUTRO5모형이 가지는 제약성인 전체 구간을 하나의 반응계수로 사용하는 문제를 해결하여 일부 반응계수(K1C, K140C, K1320C, SOD)에 대해서는 Segment별로 반응계수를 달리 부여할 수 있도록 하였으며 연계모형에 '95년 3월의 물수지분석 결과유량을 적용하였다.

표 4. 연계모형의 주요 추정 반응계수

반응 계수	추정 결과	문헌상의 범위	비 고
K1320C (day ⁻¹)	0.02~0.10	0.09~0.13	각 Segment별로 입력
K140C (day ⁻¹)	0.50~5.00	-	각 Segment별로 입력
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 입력
SOD (g/m ² /day)	0.40~2.00	0.20~4.00	각 Segment별로 입력

이들 추정 반응계수값을 사용하여 7개의 수질측점별(안동, 낙동, 왜관, 고령교, 적포교, 진동, 삼랑진)로 '95년 3월 유량의 수리결과로 연계모의한 8개 수질항목별 농도 모의치를 실측치와 비교하기 위해 하류방향으로 그림 2와 같이 나타냈으며, 환경부의 수질측정항목에 포함되어있지 않은 클로로필-a를 실측하여 반응항목에 추가시킴으로써, BOD, DO 뿐만 아니라 인계열 및 질소계열에서도 실측치와 비슷한 경향으로 모의됨을 알 수 있었다. 예측수질항목 전반에 걸쳐 금호강유입부 이후에서 모의치와 실측치 사이에 차이가 나타나는 현상을 보였다. 또한, 각 지천 유입부 직하류에 위치한 수질측정 지점들에서 보면 실측농도와 비교할 때, 다소 차이는 있었지만 비슷한 경향성을 가짐을 볼 수 있고, 이는 보다 양질의 수문자료를 통한 모형 모의시간대의 정확한 실제 본류유량과 지류부 유량을 확보하고 모형에 수반되는 수질항목자료를 현장측정 등의 방법으로 시간대별로 보유할 수 있다면 어느 정도는 개선되리라 생각된다.



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

그림 2. 수질측점 위치별 농도변화('95년 3월)

5. 저류대 및 비보존성 물질의 손실을 고려한 이송·확산 예측

Bencala(1983)는 저류대(storage zone)를 포함하는 이송·확산방정식의 해석을 위해 식 (1)과 식 (3)을 제안하였는데 이는 저류대(storage zone)가 오염물질의 일부분을 저장하고 있다가 서서히 수로부분으로 방출하는 시스템으로 설명되어질 수 있다. 본 연구에서는 식 (1)을 식 (2)와 같이 변형시켜 저류대효과 및 비보존성 물질의 손실을 포괄적으로 고려할 수 있게 하였으며, 6점 음형 유한차분법으로 해석하여, 비교적 경과가 상세히 밝혀진 '94년 6월 30일부터 7월초 사이에 발생한 낙동강 디클로로메탄 오염사건에 모형의 적용성을 검토하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (AD \frac{\partial C}{\partial x}) + \alpha(C_s - C) \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (AD \frac{\partial C}{\partial x}) + \alpha(C_s - C) - KC \quad (2)$$

$$\frac{dC_s}{dt} = -\alpha \frac{A}{A_s} (C_s - C) \quad (3)$$

누출이 발생한 성서공단에서부터 본포취수장까지 100km구간에 대한 모의를 실시하였는데, 성서공단에서 1.75ton의 디클로로메탄이 유입 되었으므로 모형의 매개변수들을 입력하여 모의를 실시한 후, 시간별 관측치와 그 결과를 비교 반복하는 방법으로 최종 매개변수 값을 산정하였다. 표 5는 추정된 최종 매개변수 값을 나타내준다. 모형의 적용에서 확산계수(D), 저류교환계수(α), 저류대의 단면적(A_s) 및 비보존성 물질의 손실율(K)을 포함한 4개 매개변수를 모두 고려하였다. 이들 4개 매개변수 중 확산계수(D)는 매개변수라고 하기 보다는 하천특성에 따라 결정되는 값이므로 Fischer(1979)가 추천한 $10m^2/sec \sim 50m^2/sec$ 값을 사용하였다. 디클로로메탄의 경우 휘발성이 강해 시간에 따른 감쇠율이 크게 나타남을 알 수 있으며, 모형의 실행 결과는 그림 3에서 비교하였다. 그림 3에서 보면 계산치와 실측치가 대체적으로 부합함을 보여주고 있으며, 따라서 낙동강 수계의 성서공단에서 본포취수장까지의 100km 구간에서 산정된 반응계수는 충분히 적용성을 가진다고 판단된다.

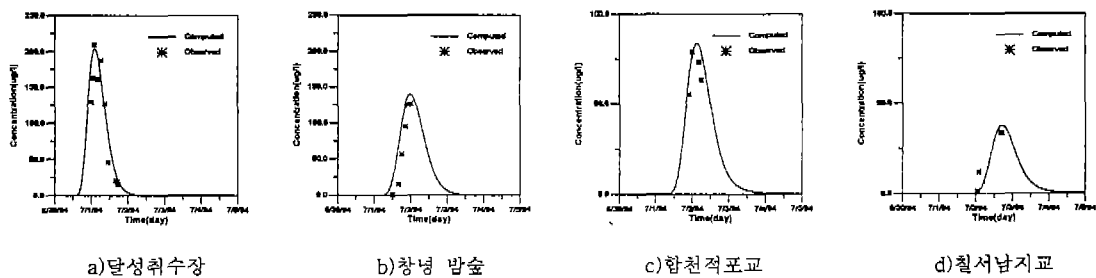


그림 3. 디클로로메탄 수질사고시 관측치와 모의치의 농도비교

표 5. 디클로로메탄 수질사고시 구간별 매개변수

구 간	매 개 변 수			
	D(m ² /sec)	α (sec ⁻¹)	As(m ²)	K(sec ⁻¹)
성 서 공 단~달성 취수장	40	1.0×10 ⁻⁴	200	1.0×10 ⁻⁶
달성 취수장~창녕 밤 숲	30	1.0×10 ⁻⁴	200	1.0×10 ⁻⁶
창녕 밤 숲~합천 적포교	30	1.0×10 ⁻⁵	200	4.0×10 ⁻⁵
합천 적포교~남강 합류부	10	1.0×10 ⁻⁶	200	1.5×10 ⁻⁵
남강 합류부~칠서 남지교	10	1.0×10 ⁻⁶	200	1.5×10 ⁻⁵
칠서 남지교~본포 취수장	10	1.0×10 ⁻⁶	200	1.0×10 ⁻⁵

6. 결 론

본 연구에서는 먼저 정상류 모형인 HEC-2모형과 수질예측모형인 WASP5모형 중 수질예측 부분의 EUTRO5모형을 기본으로 수정작업을 통한 연계모형을 구성하여 낙동강 수계에 그 적용성을 평가하였으며, 저류대 및 비보존성 물질의 손실을 고려한 이송·확산방정식을 재구성하여 그 거동 특성을 해석함으로써 저류대효과 및 비보존성 물질의 손실을 포괄적으로 고려할 수 있게 하였다. 하천수질의 중·장기적 예측을 위해 개발된 연계모형은 일반 오염물질로 인한 수질 변화를 예측하여 원수수질 및 용수공급에 관한 영향을 평가하고 이에 따라 적정 수질관리 방안을 제시할 수 있을 것으로 생각되며, 저류대 및 비보존성 물질의 손실을 고려한 이송·확산모형은 낙동강 유역에서 발생할 수 있는 독성오염물질의 누출사고시 구간별 도달시간, 농도변화 등의 정량적 분석과 누출량 및 누출지점의 추적을 통하여 현장수습방안에 대한 의사결정 과정에서 하나의 지침이 될 수 있을 것으로 사료된다.

7. 참고문헌

- Ambrose, R. B., Jr., Wool, T. A., and Martin, J. L. (1993). "The Water Quality Analysis Simulation Program, WASP5", EPA.
- Bencala, K. E., and Walters, R. A. (1983). "Simulation of Solute Transport in a Mountain Pool-and-Riffle Stream : A Transient Storage Model", Water Resources Research, Vol. 19, No. 3, pp. 718-724.
- Day, T. J. (1975). "Longitudinal Dispersion in Natural Channels", Water Resources Research, Vol. 11, pp. 909-918.
- Fischer, H. B. (1967). "The Mechanics of Dispersion in Natural Streams", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 93, No. HY6, pp. 187-216.
- 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.
- Hydrologic Engineering Center (1990). "HEC-2 Water Surface Profiles, User's Manual", U.S. Army Corps of Engineers.
- 정태성, 서일원 (2000). "저장대모형의 매개변수 추정식 개발", 대한토목학회, 2000년도 학술발표회 논문집(3), pp. 547-550.