

〈論 文〉

수문인자에 의한 하천 수질 변화에 관한 연구
—QUAL2E 모형 중심으로—A Study on Changes of Water Quality in River by Hydrologic Factors
—QUAL2E Model Application—

柳 熙 正*

LYU Heui Jeong

Abstract□ In this study, reach boundaries in QUAL2E Model were set by the locations of point-waste discharge or tributary input and measured or direct calculated hydrologic factors were used in computation as much as possible. South Platte Experimental River in Colorado, USA was selected as a target river and data collected during September 1991 and January 1992 periods were used for calibration and verification, respectively. Constituents modeled in this study are 5-day carbonaceous biochemical oxygen demand(CBOD₅) and dissolved oxygen (DO). The good agreement was obtained between a calculated using this model and observed, less than 5% to DO and about 20% to CBOD₅. According to the result of water-quality prediction, experimental river is classified as the 4th category by the criteria of environmental protection agency in the USA in 2001

요 지: 본 연구에서는 QUAL2E 모형의 계산구간을 유입지점마다 분할하여 정하고, 계산에 필요한 수문인자들 및 수질자료를 가능한한 실측치나 또는 직접계산치로 사용했다. 대상하천은 미국 Colorado 주의 South Platte 강을 선정하고, 수질항목 용존산소(DO)와 생물학적 산소요구량(CBOD₅)에 대하여 1991년 9월과 1992년 1월 자료를 사용하여 계산하고 관측치와 비교한 바, DO는 5%이내, CBOD₅는 20% 정도에서 잘 일치하였다. 수질예측결과에 의하면 2001년에는 대상하천의 수질이 미환경청 기준으로 4등급수에 해당되는 것으로 나타났다.

1. 서 론

하천의 수질변화는 유입되는 오염 물질이 유량 및 유속 분포에 따라 희석 확산 분산 작용을 일으키며 유하하는 동안 수리 수문학적 특성을 나타내는 각종 수문인자의 변화와 생화학적 반응 및 오염원의 분포상태, 기후변화 등에 따라 영향을 받게 되므로 신뢰도가 높은 수질예측을 위하여는 많은 연구노력을 요하게 된다. 최근 도시화와 산업화로 인한 수질의 중요성 인식으로 하천수질의 예측과 개선 및 관리에 대한 정보를 얻기 위해, 하천 오염물질의 시간적, 공간적 반응상태를 이론적으로 체

계화하여 수학적으로 나타내는 모형화(modeling)와 해석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재까지 개발된 수질 예측 모형을 살펴보면, 유영석(1989)은 Streeter-Phelps (1925)가 용존산소의 평형방정식을 발표한 이래, DOSAG, MIT, PIONEER, WIRQAS, QUAL I, QUAL II, QUAL2E 등이 있으며, 예측수질항목, 해석목적, 모형의 특성에 따라 분류될 수 있다고 보고한 바 있다.

QUAL2E 모형은 TWDB(Texas Water Development Board)에서 Masch등(1971)이 개발한 QAUL I 모형을 미국 EPA(Environmental Protection Agency)에서 Roesner등(1981)이 수질항

* 正會員, 安城産業大學校 土木工學科 教授

목을 추가 발전시켜 QUAL II 로 했고, Barnwell 등(1985)이 QUAL II 모형에 PC(Personal Computer) 사용이 가능하도록 개선한 것이다. 본 모형은 Brown and Barnwell(1987) 이 하천의 흐름이 종단방향으로 정상상태(steady flow)이고 횡단방향으로는 모든 수질특성치가 완전혼합 되었다는 가정하에 개발 발전시킨 것으로 동적(dynamic) 모형인 경우는 유출 및 조류에 의한 부영양화 등 수질의 시간적 변화를 분석 할수 있으며, 예측결과 의 높은 신뢰도와 계산의 간편성 및 장기예측의 타당성이 인정되어 현재 국내외적으로 널리 사용되고 있다.

수질예측의 신뢰도를 높이기 위하여는 양질의 입력자료 확보와 모형 자체의 자연현상 반영에 대한 불완전성의 최소화가 이루어져야 하는데, 국내 현실은 오염원의 기본조사와 정성·정량적 수질 기초 자료의 부족으로 예측모형의 개발은 극히 힘든 실정이며, 1980년대초부터 외국에서 개발된 모형을 국내에 들여와 적용하기 시작하였으나 지역특성이 다른 관계로 간접계산이나 통계적 방법으로 계산처리하는 어려움이 있다. 외국에서는 정확성있는 실측자료와 시료의 정밀한 분석으로 처리된 충분한 기초자료를 확보하고 종합적인 분석으로 활용이 용이한 모형의 개발과 예측의 신뢰도를 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구는 QUAL2E 모형을 기본 모형으로 선정하여 수리 수문 인자(유량, 유속, 하도단면적, 수심, 율변, 동수반경, 단면저폭, 단면측구배, 하상구배, 도달시간, 수온 등)들을 실측자료나 또는 직접 계산치로 사용하고, 대상구간내의 지천 합류점과 점오염원이 있는 지점마다 분할하여 계산한 결과치를 USGS(United State Geographical Survey)에서 관리하는 17개 관측소의 관측치와 비교분석하여 모형의 적용성을 검토하고 하천 주요지점의 수질변화를 파악하여 장래의 수질을 예측 하고져 하였다. 연구 대상 하천은 미국 Colorado 주에 위치하고 Denver 시를 관통하는 South Platte 강의 상류부 14.5 mile 구간에 1991년 9월 자료로 보정(calibration)계산하고, 1992년 1월의 자료를 검증(verification)에 사용하였다(Figure 2 참조).

2. QUAL2E 모형의 고찰

2.1 일반적 특성

Brown and Barnwell(1987)은 QUAL II 모형을 1차원 모형으로 정상상태(Steady State) 또는 준동적상태(Pseudo Dynamic State)의 두가지 모드가 가능하며, 수질예측항목은 Algae, Org-N, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, Org-P, PO₄-P, CBOD, DO, Coli., ANC, Temp., 3CM의 15개 항목으로서 필요에 따라 조합으로 선택하여 모형화할 수 있도록 QUAL2E로 발전시켰다.

대상 하천은 수리학적 특성이 동일한 구간(reach)으로 구분되며, 다시 수질계산지점을 고려하여 계산요소(computational element)로 세분되는데, 계산요소에는 상류수원, 표준상태, 합류점 상태, 측면유입, 導水 등에 관한 사항들이 포함된다(Figure 1,2 참조). 계산과정은 입력자료의 작성,보정, 예측의 3단계로 이루어 진다.

2.2 물질 수지 방정식 (Mass Transport Equation)

다음의 식(1)은 QUAL2E 모형의 기본식으로서 계산요소에 관한 물질의 흐름(advection)과 확산(dispersion), 수괴내부의 반응 및 상호작용, 유입과 유출을 포함하고 있다(Figure 1 참조).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial(A_x D_t \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} dx - \frac{\partial(A_x u C)}{\partial x} dx + (A_x dx) \frac{dC}{dt} + s \quad (1)$$

여기서, M = 물질의 질량 [M]

x = 거리 [L]

t = 시간 [T]

C = 농도 [ML⁻³]

A_x = 하도 단면적 [L²]

D_t = 종단 방향 확산계수 [L²T⁻¹]

u = 평균유속 [LT⁻¹]

s = 유입량 또는 유출량 [MT⁻¹]

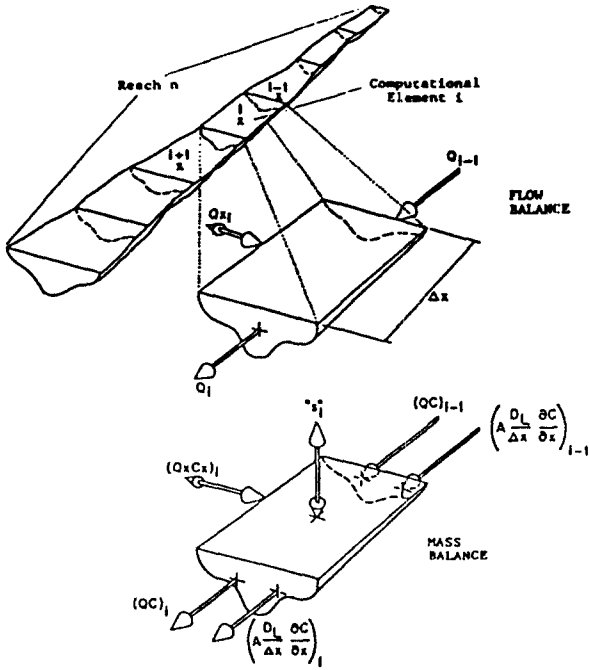


Figure 1 Discretized stream system

$M = V \cdot C$ 이고 $V = A_x \cdot dx$ 이므로

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(A_x D_L \frac{\partial C}{\partial x})}{A_x \partial x} - \frac{\partial(A_x u C)}{A_x \partial x} + \frac{dC}{dt} + \frac{s}{V} \quad (2)$$

식 (2)는 하도단면적, 평균유속, 수심이 주어지면 계산될 수 있는데, QUAL2E 모형에서는 수리 모형이나 실측자료를 이용하여 각지점별로 유속과 유량을 산정하고, 유속과 유량, 수심의 관계를 구간별로 회귀분석법에 의하여 사다리꼴 단면으로 간주하여 Manning식에 의해 계산하도록 되어있다. 본 연구에서는 Manning식을 사용했다.

$$Q = (1.486/n) A_x R^{2/3} S \quad (3)$$

여기서, R = 동수반경 [L]

n = 조도계수

Se = 에너지선 구배

식(3)에서 하도단면적의 저폭과 측면구배, 하상구배를 실측치로 주고 반복계산법인 Newton-Raphson Method에 의하여 수심과 단면적을 계산하고 평균유속은

$$u = Q/A_x \quad (4)$$

식(4)에서 계산했다.

CBOD와 DO는 식 (2)의 물질 수지 방정식으로 표시되는데, 수괴 내부의 반응과 상호작용 항인 dC/dt 항은 다음과 같다.

CBOD 반응식

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L - K_3 L \quad (5)$$

DO 반응식

$$\frac{dO}{dt} = K_2(O^* - O) + (\alpha_3 \mu - \alpha_4 \rho) A - K_1 L - K_4/d - \alpha_5 \beta_1 N_1 - \alpha_6 \beta_2 N_2 \quad (6)$$

여기서, K_1 = 탈산소계수 (deoxygenation rate coeff.), day^{-1}

K_2 = 재폭기계수 (reaeration rate coeff.), day^{-1}

K_3 = BOD의 침전율, day^{-1}

K_4 = 하상퇴적물에 의한 O_2 소모량, $g/ft^2 \cdot day$

L = U-BOD conc., mg/l

O^* = 포화용존산소농도, mg/l

O = 용존산소농도, mg/l

α_3 = 조류의 광합성에 의한 산소 발생량, $mg-O/mg-A$

α_4 = 조류의 호흡에 의한 산소 소모량, $mg-O/mg-A$

α_5 = 암모니아(NH_3)의 산화에 따른 산소 소모량, $mg-O/mg-A$

α_6 = NO_2 의 산화시 산소 소모량, $mg-$

- O/mg-A
- d = 평균수심, ft
- β_1 = 암모니아 산화율, day⁻¹
- β_2 = nitrite(NO2) 산화율, day⁻¹
- N₁ = 암모니아 농도, mg-N/l
- N₂ = nitrite(NO2) 농도, mg-N/l
- ρ = 조류 쇠퇴율, day⁻¹
- A = 조류의 농도, mg-A/l

수질예측 모형에서 반응계수를 비롯한 각종 매개 변수(parameter)보정값은 하천특성치로서 고정되어, 장래에 예상되는 오염 부하량등 물리, 화학, 생물학적 특성변화에 관한 자료의 입력과 함께 장래의 수질예측에 사용되므로 실측 및 기존자료를 종합분석하여 합리적으로 추정 되어야 한다.

QUAL2E 모형의 기본이론과 계산기법 및 사용 방법은 "The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS : Documentation and User Model(EPA 1987)"에 상세히 정리되어 있다.

2.3 계산 및 보정

Brown and Barnwell(1987)은, 식 (2)에 대하여 공간적으로는 중앙차분을 시간적으로는 후방차분을 사용하는 음해법의 차분방정식을 세워, 3개 격자점(grid point)간의 관계로 표시된 삼중대각행렬(tridiagonal matrix)를 구성하여 Gauss 소거법으로 해를 구했다.

보정(calibration)은 실측치와 계산치의 차이를 최소화하여 신뢰도를 높이는 과정으로서 반응계수와 불확실성이 있는 Parameter들을 조정하는 작업인데, 수정을 반복수행하여 전체적으로 최적의 상태를 찾았다.

3. 자료수집 및 검토

3.1 대상 하천의 선정

대상하천은 미국 Colorado주의 중앙부 록키산맥의 Alma에서 발원하여 Denver시를 지나는

South Platte강의 상류부로서, Denver시의 50th Avenue 관측소(USGS NO.06714130)로부터 상류측으로 Littleton 관측소(USGS NO.06710000)까지 14.5mile 구간을 선정했다(Figure 2 참조).

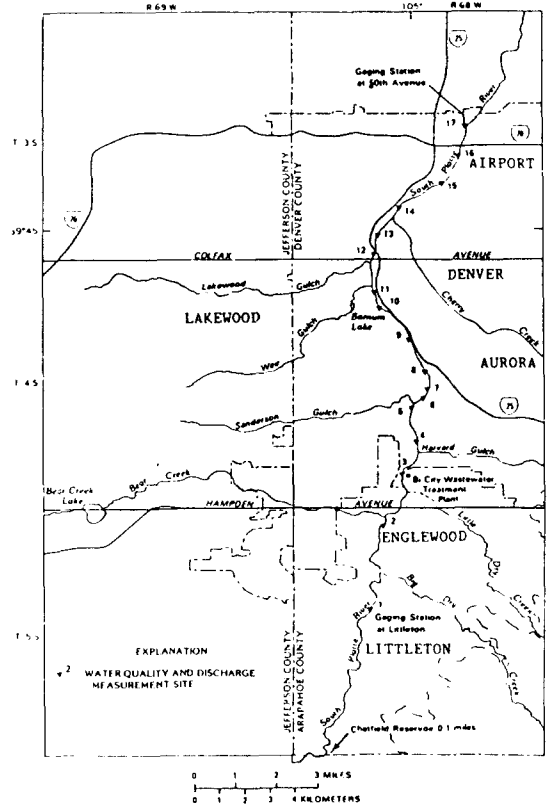


Figure 2. Location of South Platte River water-quality and discharge measurement sites

본 대상구간은 USGS에서 1942년부터 수문 및 수질자료를 관측하고 CDH(Colorado Department of Health)에서 1962년부터 수질시험 대상하천으로 지정관리되고 있어 양질의 기초자료들이 확보되어 있으며, Figure 3에 나타난 바와 같이 대상구간으로부터 상류측 5mile 지점에 Chartfield 저수지가 있어 유량을 조절하면서 자료관측이 가능하도록 되어 있고, 14.5mile 구간내에 USGS 관할 수문 수질 관측소 17개소가 설치운영되고 있다(EPA, 1992, A, B, C).

유역상황은 구간의 상류 우측에 Littleton과 Englewood 신도시 주거지역과 좌측 Lakewood 상공업지역이 분포하고 연속하여 Colorado주의 수도인 Denver시가 발달해 있으므로 학교, 병원, 동물원, 주거지역, 상공업지역, 공항 등의 도시하수가 유입되고 있다.

Ellis등(1984)은 전체유역 중 주거지역 43%, 상공업지역 19%, 농지 및 공한지 38%로 구성비를 조사보고한 바 있으며, 년평균강우량 15.3in, 유역면적 187mi², 고도 5,310ft, 경사도 13 ft/mi로 고도가 높고 경사도가 급하며 대도시 지역을 지나므로 원수질(head waterquality)은 비교적 청정

하나 도시지역에서 수질이 불량한 상태로 나타나고 있다.

Figure 2에 나타난 바와 같이 구간내의 주요 시설물로는 Englewood Bi-city 폐수처리장(RM 10.13)과 Zuni Power Plant(RM 4.56)가 있고, 3ft 높이의 낙차(water falls)가 3개소(RM 12.8, RM 5.70, RM 3.10)에 설치되어 있다. 주요 지천은 Bear Creek(RM 10.84)와 Lakewood Gulch(RM 4.43), Cherry Creek(RM 2.38)이 있어 하수를 유입시키는 오염원이 된다(EPA, 1992, A, B, C,).

Table 1. Water-quality sampling and discharge measurement sites for the South Platte River, tributaries, and other inflows

Site number	Site reference code	U.S. Geological Survey station number	River miles upstream from SP 1600	Site name
1	SP 100	06710000	14.51	South Platte River at Littleton
1	TR 210	393750105005100	13.40	Big Dry Creek at mouth
2	SP 200	393855105004800	11.89	South Platte River above Bear Creek
2	TR 310	06711500	11.82	Bear Creek at mouth, at Sheridan
3	TR 320	393935105000500	10.84	Little Dry Creek at mouth
4	TR 330	3939361050000600	10.78	Storm sewer at Dartmouth Avenue(west bank)
3	SP 300	06711565	10.44	South Platte River at Englewood
5	TR 410	394003105001300	10.25	Unnamed creek above PSCO dam(west bank)
6	TR 420	3940051050000300	10.13	Bi City WWTP effluent(east bank)
7	TR 440	394016104595100	9.82	Arapahoe PSCO effluent(south bank)
8	TR 460	394029104594800	9.56	Harvard Gulch at mouth
4	SP 400	394042104595100	9.32	South Platte River at Evans Avenue
5	SP 500	06711590	8.48	South Platte River at Florida Avenue, at Denver
9	TR 610	06711610	8.44	Sanderson Gulch at mouth, at Denver
6	SP 600	394128104594700	8.27	South Platte River below footbridge
7	SP 700	394141104593300	7.94	South Platte River above Mississippi Avenue
10	TR 810	394149104592900	7.79	Storm sewer at Mississippi Avenue(east bank)
8	SP 800	394210104594100	7.33	South Platte River above Sante Fe overpass
9	SP 900	394241104595900	6.68	South Platte River below Alameda Avenue
10	SP 1000	394321105000500	5.59	South Platte River above Valjeo Street
11	TR 1110	394321105000600	5.59	South sewer at Valjeo Street
11	SP 1100	394345105005800	5.29	South Platte River above 8th Avenue bridge
12	TR 1120	394352105010000	4.96	Lakewood WWTP Effluent above Weir Gulch
13	TR 1130	06711622	4.95	Weir Gulch at mouth
14	TR 1135	394405105010000	4.78	Zuni Street Power Plant # 1(west bank)
15	TR 1140	394414105010200	4.53	Zuni Street Power Plant # 2(east bank trough)
16	TR 1145	394416105010400	4.56	Zuni Street Power Plant # 3(west bank)
17	TR 1150	06711800	4.38	Lakewood Gulch at mouth, at Denver
18	TR 1160	394424105010200	4.33	Sloans Lake outfall(old 15th Avenue bridge)
12	SP 1100A	394433105005800	4.15	South Platte River above 17th Avenue underpass
19	TR 1210	394434105005800	4.14	Ellis Foods effluent
13	SP 1200	394503105004800	3.63	South Platte River at 7th Street
20	TR-1305	394503105004700	3.62	Storm sewer at 7th Street above Confluence Park
21	TR 1310	394513105002600	3.14	Cherry Creek at mouth
14	SP 1300	06714000	2.73	South Platte River at Denver
22	TR 1420	394543104595400	2.38	Storm sewer at 23rd Street bridge
15	SP 1400	394602104590500	1.54	South Platte River above 31st Street bridge
23	TR 1510	394603104590400	1.53	Ice Plant effluent at 31st Street bridge
24	TR-1520	06714100	1.06	Thirty Sixth Street storm sewer at Denver
16	SP 1500	394634104583800	0.80	South Platte River below 38th Street bridge
25	TR-1610	394635104583800	0.79	Storm sewer below 38th Street bridge
17	SP 1600	06714130	0.00	South Platte River at 50th Avenue, at Denver

3.2 계산구간(Computational Reach)의 구성

QUAL2E 모형에서 모든 계산요소(computational element)는 같은 길이로 해야만 하고, 구간(Reach)은 계산요소보다 길이를 짧게 할 수 없다. 이 제한성 때문에 짧은 구간에서 수리 수문학적 또는 수질특성이 변할 경우에 오차 발생의 원인이 될 수 있다.

본 연구에서는 QUAL2E 모형의 구간과 계산요소의 구분이 없이, 대상구간 14.5mile 내에 수문 수질에 관련한 특성변화를 일으킬 수 있는 유입지점을 모두 조사하여 25개 지점(TR)으로 구분되는 24개 계산구간(computational reach) 길이를 0.01-2.20mile 범위에서 구성했다. 또한 수문 수질관측소(SP) 17개소가 대상구간내에 위치토록 하였다(Table 1 참조).

3.3 수문자료

대상구간내의 흐름을 정상상태(steady flow)로 유지시키면서 수문 수질 자료를 관측하기 위하여 Chatfield 저수지에서 5일간 연속하여 방류량을 일정량으로 조절하고 5일째에 24시간 동안 자료관측을 실시하였다.

1991년 9월 자료 관측시에는 방류량을 20ft³/sec로 유지시켰고, 1992년 1월 자료는 방류량 50ft³/sec로 유지시키면서, USGS 관할 17개 관측소에서는 4시간 간격으로 6회에 걸쳐 유량관측을 실시하고 25개 오염원으로부터 시료채취와 동시에 유량을 2회이상 측정하여 평균하였다. 또한 도달시간(travel time)과 온도를 측정하였다(Table 2 참조). 각 구간(reach)의 유량은 일정한 것으로 가정하여 Manning식의 수리 모형으로 반복 의한 계산치와 1991년 9월과 1992년 1월 관측된 자료의 비교는 Figure 3, 4와 같이 나타났다. (Table 2 참조).

Figure 3과 4에서 계산치와 실측치는 잘 일치하나 계산치가 측정치보다 적게 나타나는 것은 지하수와 유역내 저류의 영향으로 사료되며, RM 13, 40 지점에서는 Littleton과 Englewood의 용수 공

급으로 유량이 감소되었으며, RM 11.82 ear Creek 지천의 유입과 RM 10.13에는 Bi-city 폐수처리장의 방류량으로 유량의 증가가 크게 나타났다.

각 구간에서 관측된 도달시간과 유량의 관계를 양대수지(log-log paper)에 plot하여 계수를 구하였다.

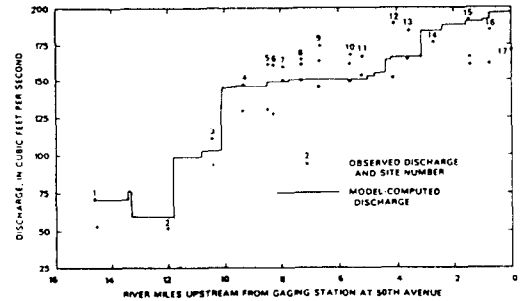


Figure 3. Observed and model-computed South Platte River discharge for the September 1991

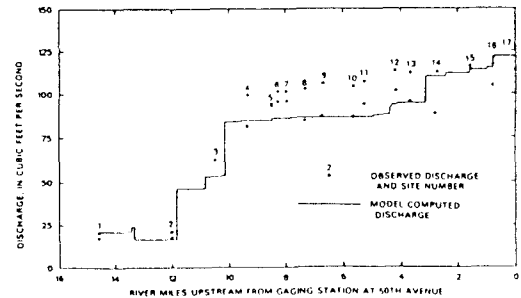


Figure 4. Observed and model-computed South Platte River discharge for the January 1992

각 지점별 단면자료와 하상구배는 Lochhead (1991)의 “South platte강 유역 조사자료”를 사용하여 단면저폭 10.20-136.40ft 범위, 측면구배 1:03-1:3.5 범위와 하상구배 1/184 -1/3250 범위와 조도계수는 0.025-0.04범위에서 구간별로 계산되었다. (Figure 5참조)

3.4 수질자료

수질의 대표 항목인 5-day CBOD(CBOD₅)와 DO에 대하여 25개 유입지점으로부터 시료를 채취

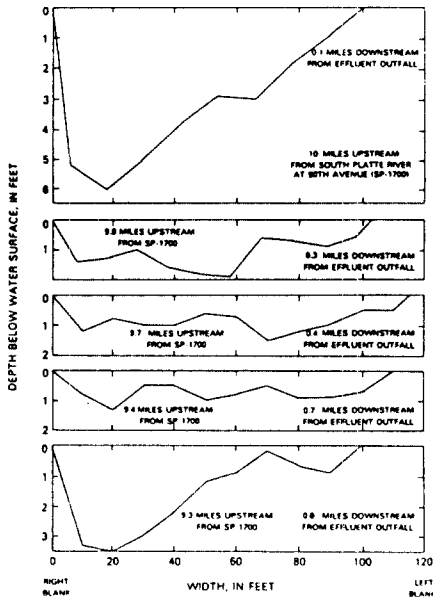


Figure 5. Typical cross section of selected sample-measurement sites

하고 17개 관측소에서는 4시간 간격으로 6회에 걸쳐 시료를 채취하였다. 또한 각 계산구간의 용존산소량을 실측하였다.

Bauer(1979)는 탈산소계수(K_1)를 반대수지(semi-log paper)상에 BOD와 측정거리를 plot하여 경사를 구하고 도달시간과의 관계에 대하여 발표한 바 있어, 본 연구에 적용했다. 재폭기계수(K_2)는 Streeter-Phelps(1925)의 방정식에 실측자료를 적용하여 계산하였다(Cadwallader 등, 1969).

BSOD(K_3)는 Gann(1982)에 의해 고안된 In-vitro Respirometer로 측정하였다(Wells 1974, Boyton 등, 1981). 낙차가 있는 3개 지점(RM 12.80, RM 5.70, RM 3.10)에서는 수질 계수 1.60, 보의 형상계수 0.80로 하여 재폭기 효과를 실험식(Cadwallader 등, 1969, James, 1984)으로 계산하고 낙차에서부터 하류측으로 진행하면서 보정을 실시하여 최적화시켰으며, 조류의 쇠퇴율(ρ)은 $0.05-0.5\text{day}^{-1}$, 조류의 최대성장율(μ_{max})은 $1.0-2.0\text{day}^{-1}$ 로 계산했으며, 이외의 계산에 필요로 되는 수분자료는 "TYPICAL RANGE FOR QUAL2E REACTION COEFFICIENTS"(Brown

and Barnwell, 1987)에서 선택 사용하였다.

Table 2. Input data used in model calibration and verification

Reach number	Mileage		Model run	Disch (ft ³ /sec.)	Travel time (hr)	Mean W Temp. (°F)	CDO ₅ (mg/l)	Diss. Ox. deficit (mg/l)
	Up	Down						
1	14.15	13.40	CAL	1.5*	2.0	67	1.8*	8.0*
			VER	21.3*	3.5	37	2.5*	10.5*
2	13.40	13.30	CAL	4.7	0.3	67	1.7	0.8
			VER	2.7	0.7	37	4.5	0.6
3	13.30	11.82	CAL	18.1	1.9	67	0.0	0.0
			VER	8.0	3.5	37	0.0	0.0
4	11.82	10.84	CAL	41.5	1.1	67	3.2	1.0
			VER	27.7	2.2	37	4.8	1.3
5	10.84	10.25	CAL	5.1	0.5	65	1.6	0.2
			VER	8.0	1.0	37	4.5	0.6
6	10.25	10.13	CAL	1.0	0.1	65	2.5	1.1
			VER	1.5	0.2	38	13.0	1.7
7	10.13	9.82	CAL	37.8	0.4	67	18.5	0.0
			VER	30.2	0.9	38	19.0	0.5
8	9.82	9.56	CAL	0.8	0.1	67	7.5	0.1
			VER	0.1	0.2	38	1.3	1.0
9	9.56	8.44	CAL	0.9	1.8	67	2.2	0.1
			VER	0.7	3.2	39	17.0	1.0
10	8.44	7.79	CAL	3.6	1.0	67	2.8	0.5
			VER	1.7	1.5	39	4.3	0.9
11	7.79	5.59	CAL	1.8	4.2	68	3.8	0.1
			VER	0.8	3.5	38	5.8	0.9
12	5.59	4.96	CAL	0.5	1.0	68	2.0	0.5
			VER	0.3	2.2	39	4.2	1.5
13	4.96	4.95	CAL	0.0	0.1	68	4.4	1.1
			VER	0.0	0.1	38	17.0	1.6
14	4.95	4.78	CAL	1.8	0.3	66	4.4	1.1
			VER	1.1	0.5	38	17.0	1.6
15	4.78	4.56	CAL	0.4	0.3	68	1.8	0.7
			VER	0.2	0.5	38	2.5	1.2
16	4.56	4.38	CAL	0.8	0.2	68	2.5	0.7
			VER	0.0	0.5	38	0.0	0.0
17	4.38	4.33	CAL	14.2	0.1	68	1.5	0.9
			VER	3.7	0.1	38	5.8	0.3
18	4.33	4.14	CAL	2.6	0.3	68	2.6	0.1
			VER	1.1	0.5	37	6.1	0.6
19	4.14	3.14	CAL	0.3	1.0	68	5.1	1.2
			VER	0.5	2.2	37	5.1	0.4
20	3.14	2.38	CAL	15.4	0.7	67	2.1	0.2
			VER	10.2	1.3	37	7.3	0.1
21	2.38	1.53	CAL	1.8	0.8	67	1.5	0.1
			VER	1.3	1.0	37	6.2	0.5
22	1.53	1.06	CAL	1.2	0.6	67	1.7	1.5
			VER	0.9	1.1	37	8.2	3.3
23	1.06	0.79	CAL	1.6	0.2	67	5.1	0.6
			VER	1.3	0.4	37	11.0	0.9
24	0.79	0.00	CAL	6.0	0.9	67	4.1	1.1
			VER	6.7	1.2	37	9.6	1.3

*: DO at beginning of the model reach

4. 계산결과 및 분석

계산 수행 결과를 실측치와 비교하면서 반응계수와 수질영향인자를 수정하는 방법으로 반복 수행하고, 낙차(water falls)가 있는 3지점(RM 12.80, RM 5.70, RM 3.13)의 재폭기(reaeration) 효과를 고려한 보정(calibration)결과 반응계수는 Table 3과 같이 나타났다.

반응계수의 범위는 대체로 QUAL2E 모형에서 선택사용되는 대표치의 범위(Brown and Barn-

Table 3. Model-calibration reaction rates

Reach number	River mileage	K_1 (day ⁻¹)	K_2 (day ⁻¹)	K_3 (day ⁻¹)	K_4 (g/l ² day)	β_1 (day ⁻¹)	β_2 (day ⁻¹)	α_1 (mg O ₂ / (mg N · day))	α_2 (mg O ₂ / (mg N · day))	α_3 (mg O ₂ / (mg N · day))	α_4 (mg O ₂ / (mg N · day))	μ (day ⁻¹)	ρ (day ⁻¹)
1-5	14.51-10.13	0.5	9.8	0.2	1.76	0.9	0.7	1.40	1.90	3.50	1.10	1.30	0.14
7-10	10.13-7.79	0.5	9.6	0.1	2.77	0.9	3.2	1.50	2.00	3.50	1.10	1.40	0.20
11	7.79-5.59	0.4	9.9	0.3	1.01	0.9	1.7	1.90	1.90	2.80	1.00	1.10	0.22
12	5.59-4.96	0.4	1.2	0.2	1.75	0.9	1.1	1.70	1.70	3.60	1.00	0.80	0.30
13-18	4.96-1.11	0.5	7.7	0.2	1.01	1.1	0.6	1.60	1.80	3.20	1.00	1.00	0.30
19	1.14-3.11	0.8	13.6	0.1	1.76	0.9	0.8	1.50	1.70	3.60	1.10	0.90	0.40
20-21	3.11-1.53	0.6	8.6	0.2	1.01	0.8	0.7	1.50	1.90	3.50	1.10	1.20	0.30
22-24	1.53-0.30	0.6	14.2	0.2	1.01	0.9	0.7	1.50	1.90	3.60	1.10	1.20	0.20

well, 1987)로 나타났으며, K_2 (reaeration rate) 값이 크게 나타나는 것은 낙차(water falls)의 영향으로 사료되며, 또한 β_2 (NO₂-N Decay) 값이 RM 10.13에서부터 RM 5.59까지 크게 나타나는 것은 Bi-city 폐수처리장의 방류로 인해 CBOD₅의 농도가 높아지므로 질소의 β_2 의 값이 증가되어 DO의 농도는 낮아지는 것으로 판단된다.

CBOD₅의 보정(calibration)과 검증(verification) 결과는 Figure 6과 7로 나타났다.

Figure 6과 7에서 CBOD₅의 보정과 검증 계산 결과는 관측치 평균값과 대체로 일치하는데, 계산치가 실측치보다 낮은 경향을 나타내며 검증결과에서는 차이가 더 큰 것으로 나타났다.

보정결과에서 Bi-city 폐수처리장(RM10.13) 지점은 CBOD₅가 1.82mg/l에서 6.05gm/l로 증가되었고 검증에서는 3.50mg/l에서 9.00mg/l로 증가되어, 약 3배에 달하며, 하류측 10mile 전구간에 계속적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 폐수처리장(RM 10.13)으로부터 상류는 청정한 수질이나 하류측은 도시 오수의 유입으로 CBOD₅ 값이 점차 증가하는 것으로 나타났다.

대상구간의 시점부(site No.2), 중앙부(site No. 6), 종점부(site No.16)에서 보정과 검증의 계산치와 관측치의 차를 백분율로 나타내면 Table 4와 같다.

Table 4에서 보면 CBOD₅보정계산결과 최대 20%, 평균 14.8%의 차이를 나타내고, 검증에서 최대 28.3%, 평균 13.1%로 나타났다. DO의 보정과 검증결과는 Figure 8과 9로 나타났다.

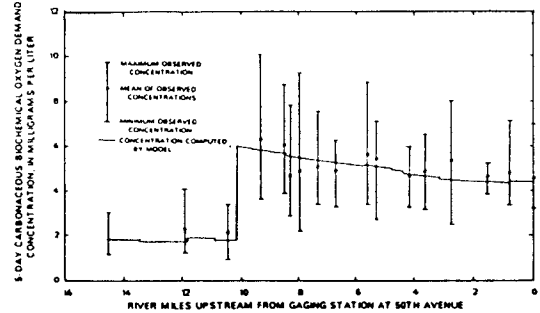


Figure 6. Observed and model-computed 5-day CBOD calibration data

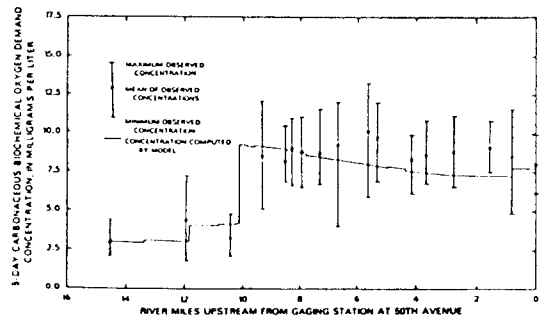


Figure 7. Observed and model-computed 5-day CBOD for verification data

Figure 8과 9에서 DO의 보정과 검증 계산 결과는 관측치 평균값과 아주 잘 일치하고 있으며, DO의 농도는 보정에서 최저 7.50mg/l, 최고 8.5mg/l, 검증에서는 최저 9.0mg/l, 최대 11.4mg/l로서 용존산소의 농도가 높은 하천으로 나타났다. 또한

Denver 50th Avenue 관측소로부터 RM 12.80, RM 5.70, RM 3.10지점에서 높이 3ft 낙차 (water falls)가 있어 용존산소의 농도를 높여주는 효과가 잘 나타나고 있다.

Table 4에서 DO의 경우 Site No.2, No.6, No. 16 지점의 보정 계산치와 관측치 차이는 최대 3.8 %, 평균 1.9%이고, 검증계산에서는 최대 4.3%, 평균 2.6%의 차이로서 5% 이내에서 일치되는 것으로 나타났다.

Table 4. Results of model calibration and verification

Constituent	Site No. 2(SP 200)			Site No. 6(SP 600)			Site No. 16(SP 1500)		
	Mean of Obs. (mg/l)	Model Comp. (mg/l)	%	Mean of Obs. (mg/l)	Model Comp. (mg/l)	%	Mean of Obs. (mg/l)	Model Comp. (mg/l)	Mean (%)
Model run	Calibration								
CBOD ₅	2.18	1.82	20.0	4.71	4.57	18.3	4.72	4.43	6.2
DO	7.72	8.02	3.8	7.53	7.51	0.3	7.69	7.80	1.5
Model run	Verification								
CBOD ₅	4.37	3.13	28.3	8.98	8.77	2.4	8.54	7.81	8.5
DO	10.68	10.82	1.3	9.25	9.05	2.2	9.64	10.05	4.3

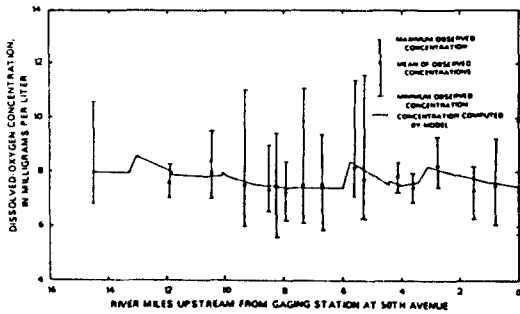


Figure 8. Observed and model-computed DO concentrations for calibration data

5. 장래의 수질예측

본 연구에서 보정한 모형을 적용하여 장래의 수질을 예측하는데는 “Water Resources Data Colorado Water Year 1987-1991”의 5년간 수질자료를 이용하여 발생부하량 및 유달율을 산정했다. 산정된 유달율은 Bi-city 폐수처리장(RM10.13)의 상류부에서 58%, 하류부에서 65%였으며, 이들 값을 적용하여 1996년과 2001년의 수질을 예측한 결과는 Figure 10,11과 같이 나타났다.

Figure 10,11에서 1991년도에 RM10.13의 상류부는 CBOD₅농도가 2.0mg/l, DO농도가 8.0mg/l로서 EPA의 수자원 이용목적별 기준으로 볼 때 2등급에 속하고, RM10.13의 하류부는 CBOD₅가 6.0mg/l, DO가 7mg/l로 3등급에 속하는 것으로 나타났다.

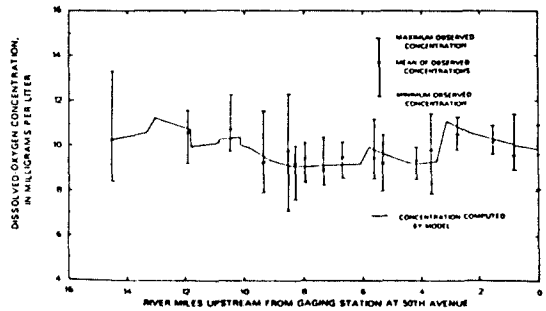


Figure 9. Observed and model-computed DO concentrations for verification data

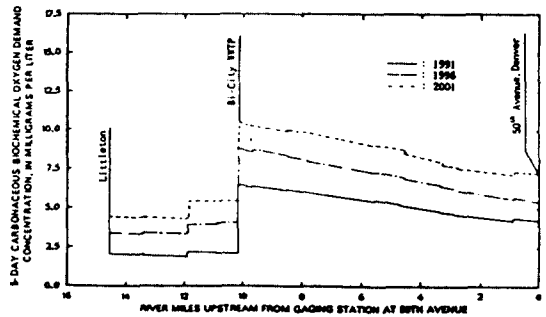


Figure 10. Predicted 5-day CBOD

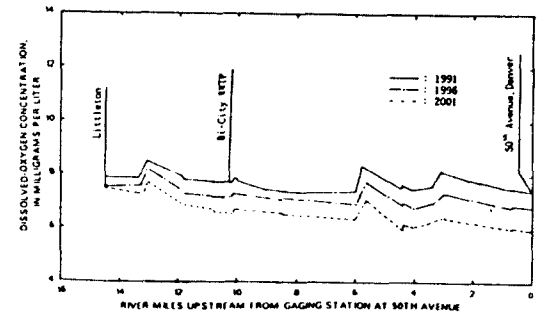


Figure 11. Predicted DO concentrations

1996년에는 RM10.13 상류부에서 CBOD₅ 3.5mg/l와 DO 7.0mg/l로 3등급의 수질이 되고, RM10.13 하류에서 CBOD₅ 8.2mg/l와 DO 6.8mg/l로 4등급으로 예측되었다. 또한 2001년에는 RM10.13 지점의 상류부에서 CBOD₅가 5.2mg/l와 DO 6.5mg/l로서 3등급에 해당되며, RM10.13 하류부는 CBOD₅ 11.0mg/l와 DO가 6.5mg/l로서 4등급 수질로 예측되어, 3차 정수처리를 거쳐야만 농업용수 혹은 농업용수로 이용할 수 있는 상태가 될 것이므로 수질보호관리의 대책이 요구된다. 특히 Bi-city 폐수처리장 지점에서 CBOD₅는 현재 6.0mg/l에서 계속 증가하여 2001년에는 11.0mg/l에 달하며, 그 영향은 하류측 10mile 전구간에 미치는 것으로 예측되어, 처리장의 확장과 도시 유입 하수의 관리가 이루어져야 할 것이다.

DO 농도는 Bi-city 폐수처리장 지점에서는 높은 CBOD₅농도의 하수유출로 감소하였으나 RM 3.0 지점의 하류부에서는 증가되는 것으로 예측되었는데, 이는 자정작용과 낙차에 의한 재폭기 효과에 의한 상승으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구는 하천 주요지점의 수질상태를 파악하고 장래의 수질예측을 위하여 QUAL2E모형을 South Platte강에 적용하여 계산에 필요한 수문인자(유량, 유속, 하도단면적, 수심, 운변, 동수반경, 단면저폭, 단면의측구배, 하상구배, 도달시간 등)들을 실측자료와 직접계산치로 사용한 보정계산결과를 관측치와 비교 분석하고 장래의 수질을 예측한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 본 하천은 상류에 위치한 Bi-city 폐수처리장(RM10.13) 지점에서 1991년 현재 CBOD₅ 농도가 1.82mg/l에서 6.05mg/l로 급증하여, 하류측 10mile 전구간에 영향을 미치는 것으로 나타났고, 이는 계속 증가하여 1996년에 8.2mg/l, 2001년에는 11mg/l에 달할것으로 예측되었으며, 하류측에 대한 영향도 계속 증가하는 것으로 예측되어, Bi-city 폐수처리장의 확장과 하수유입에 대한 보호관리 대책이 이루어져야 할 것이다.

2. EPA의 CBOD₅ 및 DO에 대한 수질기준으로

볼 때 현재 Bi-city 폐수처리장 상류부는 2등급 수질에 속하며, 하류부는 3등급에 속하나, 1996년에는 상류부가 3등급, 하류부는 4등급수가 되며, 2001년에는 상류부 3등급, 하류부 4등급의 수질이 예측되어, 이때에는 3차 정수처리를 거쳐야만 농업용수 혹은 농업용수로 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 현재 DO 농도는 8.0mg/l로 높은 편이나, 예측결과 1996년에 7.0mg/l, 2001년에 6.0mg/l로 감소될 것으로 나타났다. 또한 Bi-city 폐수처리장 지점의 높은 CBOD₅ 하수유출로 DO 농도가 감소하지만 RM 3.0 지점하류에서 증가를 보이는 것은 자정작용과 3개소의 낙차로 인한 재폭기 효과에 기인한 것으로 사료된다.

4. 계산치와 관측치의 차이는 DO가 약 5%이내, CBOD₅가 약 20%로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

5. 본 하천의 보정반응계수는 $K_1=0.4-0.8\text{day}^{-1}$, $K_2=4.2-14.2\text{day}^{-1}$, $K_3=-0.1-0.3\text{day}^{-1}$, $K_4=1.01-2.77\text{g/ft}^2\text{-day}$ 로 결과되었다.

6. 수문인자를 가능한한 실측자료나 직접계산치를 사용하여 장래수질을 예측하는 것이 합리적인 것으로 사료된다.

-감사의 글-

본 연구는 1991년도 대학교수 국비 해외파견 연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 교육부 당국에 심심한 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. 김성순, 이양규, 고강영(1990), "오염된 하천의 수질예측을 위한 수치모형에 관한 연구", 대한상하수도학회지, 제 4 권, 제 1 호, pp.50-62.
2. 류희정(1987), "유한차분법에 의한 하천의 홍수와 해석에 관한 연구", 박사학위논문, 중앙대학교 대학원 토목공학과, pp.12-17.
3. 박상진등(1987), "PC용 하천수질관리 모델의 개발(1)-반응계수에 대한 연구를 중심으로-", 한국건설기술연구원, pp. 20-34.
4. 안태홍(1988), "QUAL2E 모형을 이용한 한강 본

- 류 수질의 예측평가에 관한 연구”, 석사학위논문, 서울대학교 환경대학원, 환경계획학과, pp.48-51.
5. 오경두, 구자용(1993), “QUAL2E 모형”, 제 1 회 수공학위탁, 한국수문학회, pp.4-1~4-93
 6. 유영석등(1989), “PC용 하천 수질 예측 모형 (KICT-QUAL)”, 한국건설기술연구원, pp.7-24.
 7. 이성기, 유태종, 강인숙(1993), “영산호 수질 예측에 관한 연구”, 대한상수도학회지, 제 6 권, 제 1 호, pp.15-24.
 8. 조홍연, 이길성, 한광석(1993), “WASP4모형의 매개변수 추정 및 검증, -팔당호를 중심으로-”, 한국수문학회, 제 35 회 수공학 연구 발표회 논문집, pp.491-500.
 9. 최홍식, 이길성(1987), “QUAL II 모형의 금강 수계에의 적용”, 대한상수도학회지, 제 1 권, 제 2 호, pp.20-33.
 10. Barnwell, O.T, Jr., et al. (1985), “Computer program documentation stream quality model QUAL2E”, EPA/600/3-85/065.
 11. Bauer, D.P., Jennings, M.E., and Miller, J.E. (1979), “One-dimensional steady-state stream water-quality model”, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations 79-45, p.215.
 12. Boynton, W.R., Kemp, W.M., Osborne, C.G., Kaumeyer, K.R., and Jenkins, M.C. (1981), “Influence of water circulation rate on in-situ measurements of benthic community respiration”, Solomons, Md., University of Maryland, Chesapeake Biological Laboratory, Contribution No.1137, p.6.
 13. Brown, C.L. and Barnwell, O.T. (1987), “The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual”, US Environmental Protection Agency.
 14. Cadwallader, T.E., and Mcdennell, A.J. (1969), “A multivariate analysis of reaeration data”, Water Research, Vol.3, pp.731-742.
 15. Ellis R.S., Doerfer T.J., Mustard H.M., Blake R. S., and Gibbs W.J. (1984), “Analysis of urban storm-run off data and the effects on the South Platte River”, Water-Resource Investigation Report, p.61.
 16. Little, W.K. and Lauria, T.D. (1989), “Water quality model calibration of input and output error criteria”, Water Resources Bulletin, American Water Resources Association.
 17. Lochhead, J. (1991), “Survey in the South Platte River basin”, Colorado Division of Water Resources.
 18. Masch, D.F. and Associates and the Texas Water Development Board (1971), “Simulation of water quality in streams and canals, theory and description of the QUAL-I mathematical modeling system”, Report 128, the Texas Water Development Board, Austin, TX.
 19. Owens, M., Edwards, R.W. and Gibbs, J.W. (1964), “Some reaeration studies in streams”, International Journal of Air and Water Pollution, Vol.8, No.8/9, pp.469-489.
 20. Roesner, L.A., Giguere, P.R. and Evenson, D.E. (1981a), “Computer program documentation for stream quality modeling (QUAL-II)”, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA. EPA-600/9-81-014.
 21. Roesner, L.A., Giguere, P.R. and Evenson, D.E. (1981b), “User’s manual for stream quality modeling (QUAL-II)”, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA, EPA-600/9-81-015.
 22. Streeter, H.W. and Phelps, E.B. (1925), “Study of the pollution and natural purification of the Ohio river”, U.S. public Health Service, Washington, DC, Bulletin No.146 (reprinted 1958).
 23. Ugland R.C., Cochran J.B., Hiner M.M., and Steger D.R. (1992), “Water resources data Colorado water year 1987-1991”, U.S.G.S, Water-Data Report 87-91.
 24. US Environmental Protection Agency, Office of Enforcement (1972), “Effects of the waste discharges on water quality of the South Platte rivers Denver Metropolitan area”, National Field Investigation Center, Denver and Region VIII, Colorado.
 25. US Environmental Protection Agency (1992), “Colorado facilities-discharge to South Platte river basin”, Region VIII.