

낙동강에서의 신뢰도해석에 의한 수질예보시스템의 개발

Water Quality Forecasting System by Reliability Analysis in the Nakdong River

한 건 연* · 김 상 호**

Han, Kun Yeun · Kim, Sang Ho

Abstract

QUAL2E-AFOSM model is developed to forecast the water quality by reliability analysis in the Nakdong River. A varied-flow analysis is performed for the reach of Waegwan to Mulgeum to estimate hydraulic parameters. An optimization technique by BFGS method is applied to determine the optimum reaction parameters and calibrations and verifications are performed based on these parameters. A reliability analysis for the stochastic analysis in a river is studied using the AFOSM method. The variations of water quality and discharge in the headwater, tributaries, and reaction coefficients are considered. Risks of violating existing water quality standards at several locations in the Nakdong River are computed by using the QUAL2E-AFOSM method. The computed results computed by QUAL2E-AFOSM model agree with those of the Monte-Carlo method in QUAL2EU model.

요 지

낙동강 유역에서 수질예보시스템의 개발을 위해서 신뢰도해석 기법에 기초한 QUAL2E-AFOSM 모형을 개발하였다. 왜관~물금 구간에 대해 수리학적 부동류 해석을 실시하였고, 최적의 반응계수 추정을 위해 BFGS 기법을 사용하여 최적화 해석을 실시하였으며, 이를 기초로 하여 모형의 보정과 검증을 실시하였다. 추계학적 해석을 위하여 AFOSM 기법을 적용한 신뢰도 해석을 수행하였다. 상류단과 주요 지류에서의 수질, 유량과 반응계수에 대한 변동성을 고려하였다. 수질 측정자료를 기초로 하여 낙동강의 수개 지점에 대한 기준 수질을 초과할 확률을 AFOSM 기법을 이용하여 산정하였다. 본 QUAL2E-AFOSM 모형에 의한 해석결과는 Monte-Carlo 기법의 결과와 일치하는 것으로 나타났다.

Keywords : reliability analysis, river water quality analysis, AFOSM method, Monte-Carlo method

-
- * 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수
 - ** 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

1. 서 론

인구의 증가와 각종 산업의 발전은 용수사용의 증대를 야기하였고 이에 수반된 생활하수 및 공장폐수를 처리하기 위해서 대규모 하수처리장 건설과 운영에 많은 예산이 투입되고 있지만 하천수질은 현저하게 개선되고 있지 못하고 있으며, 특히 갈수시와 저수시의 수질악화는 커다란 사회문제로 대두되고 있다. 특히 낙동강 유역의 경우 대구, 구미, 왜관, 김천 등에서의 대규모 오염부하가 금호강 등의 주요 지류를 통하여 본류부로 유입되고 있으며 하류부 칠서, 원동, 매리, 물금 등에서는 많은 양의 하천수를 취수하여 부산, 마산, 창원지역 등의 상수원수로 사용하고 있는 실정이다. 최근에 들어서 낙동강 유역에서는 1991년 폐놀유입, 1994년 암모니아성 질소유입 및 디클로로메탄 오염사건, 1996년에 가열된 바 있는 위천공단 설립의 논쟁 등과 함께 최근 3여년간 계속되는 영남지역의 가뭄현상과 더불어 나타나는 수질악화는 이 유역에서 신뢰도 해석기법을 도입한 보다 효율적인 수질관리 기법의 개발을 절실히 요구되고 있다. 따라서, 한정된 수자원의 효율적인 수질관리를 위해서는 기존의 확정론적 방법 이외에도 신뢰도 해석에 의한 정량적이고 과학적인 수질예보시스템의 도입이 시급하다.

본 연구의 목적은 낙동강 유역에서 수질관리를 위해서 AFOSM(Advanced First-Order Second-Moment) 기법을 도입한 신뢰도 해석을 이용하여 상류부의 주요 지류 및 하수처리장에서의 오염 부하 및 수질관련 반응계수의 변동성을 고려하여 하류부에 위치한 취수장에서의 확률론적 수질예보를 실시하고자 함에 있다. 이를 위해서 낙동강의 왜관-물금에 이르는 유역에 대하여 주요 지류의 오염원과 그 부하량을 조사하고, 이 유역의 수리, 수문학적 흐름 특성치를 산정하였다. 확정론적 해석기법에 의한 보정과 검증은 실시하며 최적의 수질 반응계수를 최적화 기법에 의하여 도출하였다. 하천 유량, 지류의 오염부하, 수질 반응계수 등의 변동 특성치를 고려하여 주요지점에서 목표 수질 기준치를 초과할 확률을 AFOSM 기법에 의해 선정하고 이를 Monte-Carlo 기법 등에 의한 계산결과와 비교하였다. 하천의 수질모형은 Streeter와 Phelps(1925)가 유기물 산화에 따른 탈산소계수와 산소 재포기에 따른 수중 용존산소 변화에 대한 모형을 최초로 제시하였으며, O'Conner (1960), O'Conner와 Di Toro(1970) 등에 의해 발전되어 왔다. 그 후 미국 EPA의 QUAL2E, WASP5에 이르기까지 많은 연구가 이루어져 수질관리

기법에 활용되고 있다. 이상과 같은 확정론적 모형에서는 항상 오차와 불확실성을 내포하게 되고 실제 모든 가능한 상황을 완벽하게 나타낼 수는 없다. 확정론적 모형이 수행하고 있는 과정에서 각종 반응상수나 매개변수들은 임의의 변동성을 가진 성분들이고, 이들 반응상수의 초기 평가치는 확정론적 모형에 있어서 현장 실측자료를 재현할 때까지 검증과정을 통하여 그 값이 변화할 수는 있으나 자연현상안에 포함된 오차나 불확실성이 완전히 제거되기는 어렵다. 하천수질의 신뢰도 해석을 위한 연구로서 Kothandaraman과 Ewing(1969)은 모형화된 하천에 대한 DO 반응을 결정하기 위해 Streeter-Phelp 식에 Monte-Carlo기법을 적용하였다. Burges와 Lettenmaier(1975)는 Streeter-Phelps 식의 불확실한 매개변수에 기인한 불확실도를 예측하기 위해서 일차오차법을 적용하였고, Monte-Carlo 기법에 의한 결과의 정확성을 조사하였다. Scavia 등(1981)은 저수지 부영양화 모형에 대한 Monte-Carlo 기법과 일차오차법으로부터 나타나는 분산예측의 차이를 조사했으며, Walker(1982)는 일차오차해석 기법에 대해서 연구하여 입력변수가 출력변수에 미치는 기여도에 통계학적 이론을 이용하였고, McDonnell 등(1982)은 용존산소 모형의 불확실성 해석을 위하여 1차오차해석 기법을 적용하였다.

Warwick와 Canale(1986)은 Streeter-Phelps 식에 대해서 입력 매개변수의 측정에 의해 발생하는 모형 출력 불확실도를 정량화하였고, Marr와 Canale(1988)은 단순한 plug-flow 모형에서의 오염물의 부하할당을 위해 신뢰도기법을 적용하였으며, Warwick(1989)는 Streeter-Phelps 식에 대한 처리과정에서의 입력 매개변수 불확실도의 상대적인 중요성을 조사하기 위해 Monte-Carlo 기법을 사용하였다. Tung과 Hathhorn(1988)은 Streeter-Phelps 식에 대한 DO 부족량의 통계학적 모멘트를 평가하기 위해 일차오차법을 적용하였고 Monte-Carlo 기법을 이용한 검증을 수행하였다. Melching과 Anmangandla(1992)은 한계적인 DO 부족량의 확률적 분포를 예측하기 위해 Streeter-Phelps 식에 대해 개선된 1차오차 해석법을 사용했으며, 그 결과는 Monte-Carlo 모의수행과 매우 근사함을 보여 주었다. 또한 Canale 과 Seo(1996)는 저수지의 수질관리를 위해서 Monte-Carlo 기법에 의한 추계학적 해석을 실시하였다. 이 분야에 대한 국내에서의 연구를 살펴보면, 전경수와 이길성(1993)이 QUAL2E 모형을 남한강과 북한강 유역에 적용하였고, 백경원 등

(1995), 한건연 등(1995b)이 한강 수중보 상류부에서의 수질해석을 위해 QUAL2E 모형에 의한 수질예측을 실시하였으며, 조홍제 등(1996)이 낙동강 하류부에서 오니준설에 따른 수질 개선효과를 QUAL2E 모형에 의해서 검토하였다. 한건연 등(1994, 1995a)은 낙동강에서의 확정론적 및 추계학적 수질해석을 위해서 확장된 Streeter-Phelps 모형에 대한 Monte-Carlo 해석을 실시한 바 있으나, 아직까지 국내에서는 AFOSM 기법을 기초로 한 신뢰도 기법을 이용한 수질예보 모형의 개발에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구는 낙동강 하류부 주요 취수장에서 신뢰도 기법에 의해 산정된 수질예보를 실시할 수 있게 되어 이 영역에서의 효율적인 수질관리에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. AFOSM 기법에 의한 불확실도 해석

2.1 AFOSM 해석

AFOSM(Advanced First-Order Second-Moment) 기법의 기본 개념은 파괴면상의 가능 파괴점, x_i^* 에서 실행함수가 0인 경우에 대하여 Taylor 급수 확장을 통해 실행함수를 선형화하는데 있다. 파괴점을 결정하기 위해

여러 가지 반복기법이 제안되어 왔는데, Rackwitz 방법이 표준적인 기법으로 알려져 있다(Rackwitz, 1976; Rackwitz와 Fiessler, 1977; Ang과 Tang, 1984). 파괴점에서 실행함수에 대한 Taylor 급수의 1차 확장식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = g(x_i^*) + \sum_{i=1}^m (x_i - x_i^*) \frac{\partial g}{\partial x_i} \quad (1)$$

Z의 기대값과 표준편차는 각각 식 (2), (3)과 같이 나타낸다.

$$E[Z] = g(x_i^*) + \sum_{i=1}^m C_i (\bar{x}_i - x_i^*) \quad (2)$$

$$\sigma_Z = \sum_{i=1}^m \alpha_i C_i \sigma_i \quad (3)$$

여기서,

$$C_i = \frac{\partial g}{\partial X_i} \quad (4)$$

$$\alpha_i = \frac{C_i \sigma_i}{\left[\sum_{j=1}^m (C_j \sigma_j)^2 \right]^{1/2}} \quad (5)$$

식 (1)에서 $g(x)$ 는 실행함수 Z를 함수로 나타낸 것이다. 만약 모든 기본변수들이 정규분포의 형태를 나타내고 있다면, 위험도 P_f 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

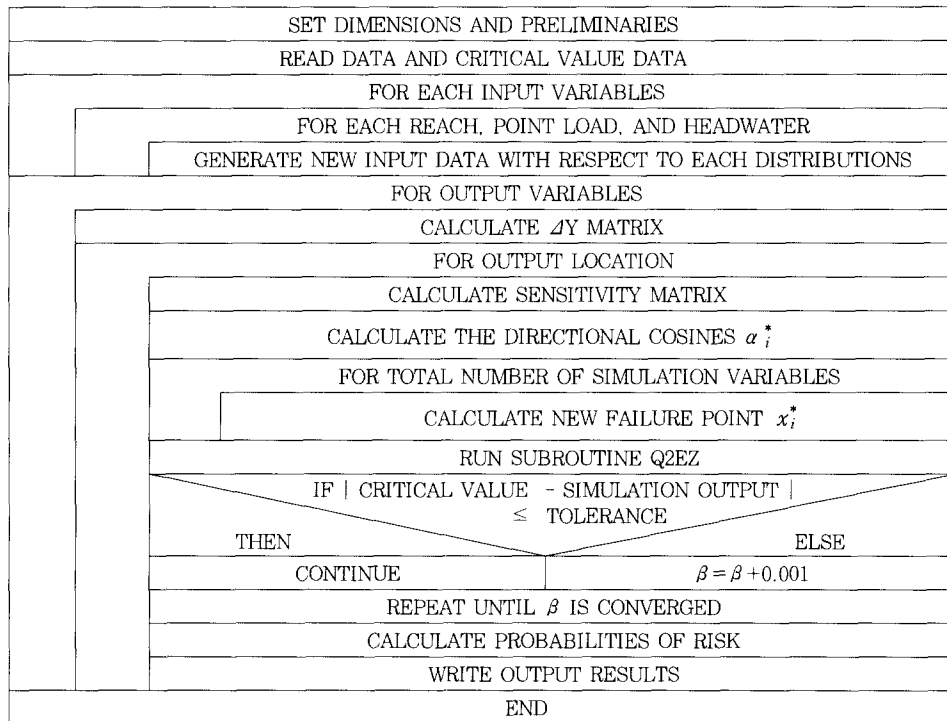


그림 1. QUAL2E-AFOSM 기법의 계산 흐름도

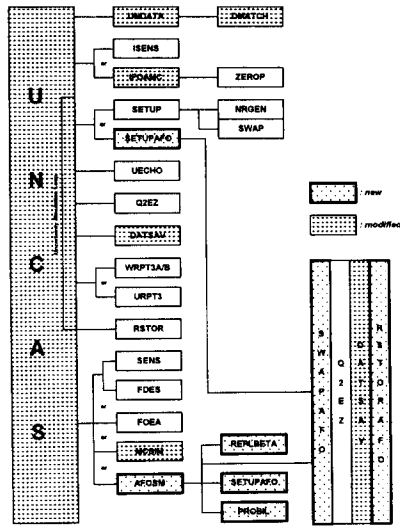


그림 2. QUAL2E-AFOSM 모형의 구조도

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (6)$$

여기서 β 는 신뢰지수이며, $\Phi(\beta)$ 는 β 에 대한 표준정규 누적분포함수이다.

2.2 AFOSM 기법을 이용한 프로그램의 개발

확정론적 수질해석 기법에 있어 그 적용성이 널리 인정된 기존의 QUAL2E 모형에 대한 불확실성 해석을 위하여 AFOSM 기법을 도입하였다. 그림 1은 프로그램의 흐름도를 보여주고 있다. 본 연구에서 개발된 프로그램은 QUAL2E-UNCAS 모형에 AFOSM 기법을 적용함으로써 기존의 Monte-Carlo 기법과 공유하여 함께 사용할 수 있도록 구성하였다. 그림 2는 QUAL2E-AFOSM 기법의 개발로 인한 기존 QUAL2E-UNCAS의 구조변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 기존 모형으로부터 7개의 부프로그램이 수정되었으며, 6개의 부프로그램이 새로이 추가되었다.

3. 확정론적 수질해석

본 연구의 적용대상은 낙동강 유역의 왜관에서 물금에 이르는 167 km 구간이다. 이 구간은 대구, 구미, 김천, 왜관 등 대도시와 공단에서 대규모 오염부하가 직접 또는 금호강 등의 지류를 통하여 본류로 유입되고 있으며 하류부의 물금 및 남강 합류부에서는 다량의 하천수가 상수원수로 사용되고 있어 효율적인 수질관리 대책의 수립이 절실한 실정이다. 수질자료는 '96년 1월

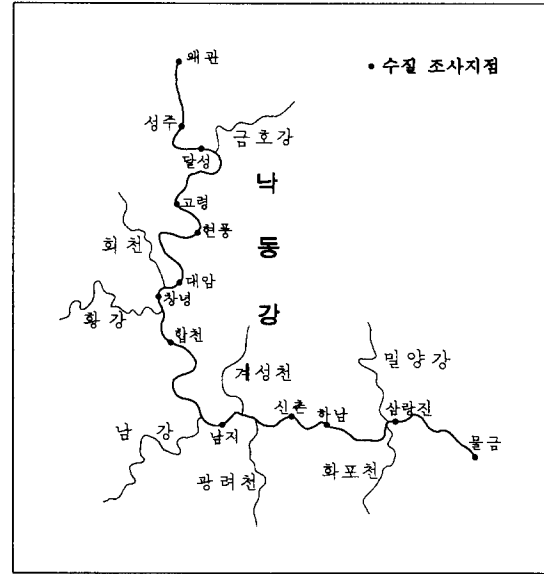


그림 3. 모형의 적용대상 유역도

부터 '96년 12월에 이르는 월별 수질측정 자료를 활용하였으며(환경부, 1996), 그림 3과 같이 본류의 13개 지점과 8개 지류에서의 수질측정 자료를 사용하였다.

3.1 수리학적 특성해석

적용대상 구간은 그림 3에서와 같이 왜관에서 물금까지 167 km 구간으로 164개의 하도단면자료를 사용하였다. 하도단면자료는 건설부(1991-1993)의 낙동강 하천정비 기본계획보고서로부터 수집하였다. 대상하천은 전체구간을 그림 4에서와 같이 구간거리 1.0 km의 167개의 요소로 구성하고 다시 167개의 요소를 지류 유입지점 등을 고려하여 동일구간내에서는 수리학적으로 유사한 특성을 갖도록 12개의 구간으로 구분하였다.

본류부류 유입되는 지천에 대한 하도단면 자료가 불충분하므로 금호강, 황강, 남강, 계성천, 밀양강 등의 지천은 점오염원으로 유입되는 것으로 하였고, 달성, 칠서, 본포, 매리 등의 취수장에서의 용수취수량도 고려하였다.

하천의 수리학적 부등류 해석을 위해서 HEC-2 모형(Haestad method)을 적용하였다(HEC, 1994). 상류단인 왜관에서의 유량과 물금에서의 수위자료를 기초로 하도내 각 지점에서의 수심, 통수단면적, 유속, 경심 등의 자료를 해석한 후, 그 결과를 구간별로 회귀분석하여 표 1에서와 같이 QUAL2E에서 적용되는 수리학적 변수인 a, b, α, β 를 산정하였다.

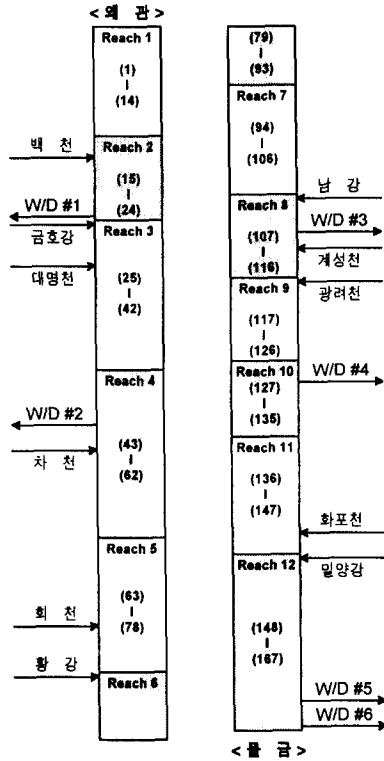


그림 4. 대상하천의 구성도

표 1. QUAL2E에서 사용되는 유량계수의 산정

구간 번호	유속 계수		수심 계수	
	a	b	α	β
1	0.0005	0.9930	9.9724	0.0062
2	0.0031	0.8881	4.2943	0.0559
3	0.0199	0.6157	1.9964	0.2046
4	0.0582	0.5727	3.4940	0.2269
5	0.0115	0.7304	4.5025	0.1446
6	0.0668	0.4370	0.8367	0.3281
7	0.0860	0.4351	1.0636	0.2969
8	0.0726	0.4168	1.2502	0.3168
9	0.0582	0.4692	1.5119	0.3088
10	0.0738	0.4560	1.6518	0.2776
11	0.0393	0.6533	2.5054	0.1629
12	0.0586	0.4556	0.9419	0.3030

3.2 최적 반응계수의 도출

수질 반응계수가 모형에 의한 계산결과에 미치는 영

향을 파악하여 추정대상 반응계수를 결정하기 위해서 민감도 분석을 실시하였다. 반응계수에 민감한 수질인 자료로서는 DO, BOD 등으로 나타났다. DO 및 BOD는 BOD의 탈산소계수 k_1 , 침전에 의한 BOD의 제거율 계수 k_3 , 하상 산소요구율 계수 k_4 에 민감하였고, 총질소와 총인의 경우 이들의 각 구성성분에 대한 민감도는 크게 나타났으나 전체적인 민감도는 비교적 작게 나타났다. 자료의 제약상 조류의 농도는 고려하지 않았다.

낙동강 본류부에 대한 최적의 반응계수를 추정하기 위하여 영향계수 매트릭스를 구성하였으며, DO, BOD의 반응계수에 대한 최적화기법을 적용하였다. 본 연구에서 이용된 최적화기법의 하나인 BFGS 기법은 Broyden, Fletcher, Goldfarb 및 Shanno 등이 개발한 최적화 알고리즘으로서 역 Hessian 매트릭스를 구하기 위한 식은 식 (7)과 같이 구성된다(Mays와 Tung, 1992).

$$G^{i+1} = G^i - \left[\frac{G\Delta g\Delta n^T + \Delta n\Delta g^T G}{\Delta n^T \Delta g} \right]^i$$

$$\left[\left(1 + \frac{\Delta g^T G \Delta g}{\Delta n^T \Delta g} \right) \frac{\Delta n \Delta n^T}{\Delta n^T \Delta g} \right]^i \quad (7)$$

여기서, G 는 Hessian 매트릭스의 inverse 값, i 는 반복계산 횟수, n 은 매개변수의 벡터, g 는 경사벡터, Δ 는 두 개의 반복계산간의 차이값으로서 $\Delta g = g^i - g^{i-1}$ 이다.

3.3 모형의 보정 및 검증

모형의 보정과 검증을 위하여, '96년 1월에서 '96년 12월까지의 낙동강 환경관리청, 한국수자원공사 등에서 측정된 자료를 수집하여 활용하였다(환경부, 1996). 본 연구에서는 '96년 6월 수질측정 자료를 사용하여 QUAL2E 모형의 매개변수를 최적화기법에 의해서 추정하였고, 그 밖의 월에 대한 다양한 유량 및 수질조건에 대하여 적용함으로써 모형의 검증을 실시하였다. 그림 5는 각각 '96년 6월의 DO, BOD에 대한 모형의 보정결과이다.

그림에서 보는 바와 같이 모형의 계산치는 그 종단형상에 있어 실측치와 비교하여 잘 일치되고 있음을 알 수 있었다. BFGS 기법에 의한 BOD와 DO의 계산오차 $\sum (e_1^2 + e_2^2)$ 는 표 2에서 보는 바와 같이 각각 3~7 구간에 대해서 0.147, 6~12 구간에 대해서 0.178로서 각각 3~4회 반복계산 후 계산을 마칠 수 있었다.

모형의 검증은 모형의 보정시 적용된 6월의 유량조건과 유사한 5월과 9월에 대해서 수행되었다.

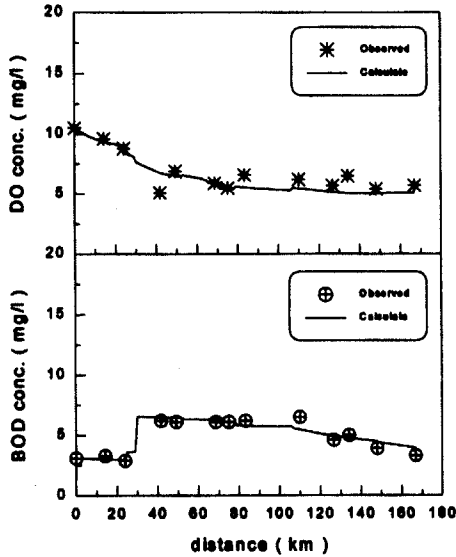


그림 5. 모형의 보정결과 ('96년 6월)

표 2. 최적 반응계수의 도출

〈 3 ~ 7 구간 〉				
Iteration	k_1	k_3	k_4	$\Sigma(e_1^2 + e_2^2)$
0	0.320	0.120	0.050	1.398
1	0.020	-0.241	1.527	1.104
2	0.050	-0.090	2.286	0.177
3	0.116	-0.111	0.350	0.147
4	0.115	-0.111	0.350	0.147
〈 8 ~ 12 구간 〉				
Iteration	k_1	k_3	k_4	$\Sigma(e_1^2 + e_2^2)$
0	0.150	-0.100	0.700	0.584
1	0.101	0.105	0.120	0.170
2	0.109	0.095	0.120	0.179
3	0.109	0.100	0.170	0.178

그림 6과 그림 7은 각각 '96년 5월과 9월에 대한 DO와 BOD의 검증결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 모형에 의한 계산치와 실측치와의 상관도는 비교적 잘 일치되고 있음을 보여주고 있다.

4. 추계학적 수질해석

확정론적 수질해석에서 구한 계수들을 중심으로 본 장에서는 추계학적 수질해석을 실시하였다. 반응계수는 자연 하천계에서 큰 불확실도를 가지고 있는 상류단의 유량자료 및 수질자료군(FFHW)과 주요 반응계수군(RXNC) 그리고 점 오염원의 부하군(FFPL)에 대한 모든 변동을 고려하였다. 이에 대한 불확실도는 QUAL2E 사용설명서(Brown과 Barnwell, 1987)에

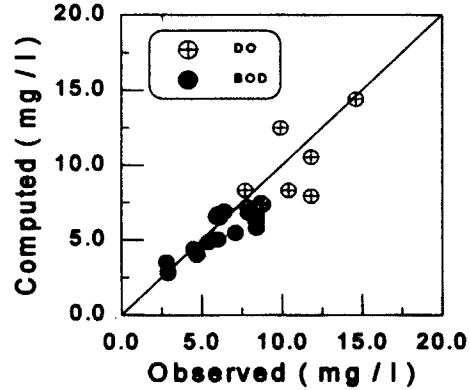


그림 6. 모형의 검증결과('96년 5월)

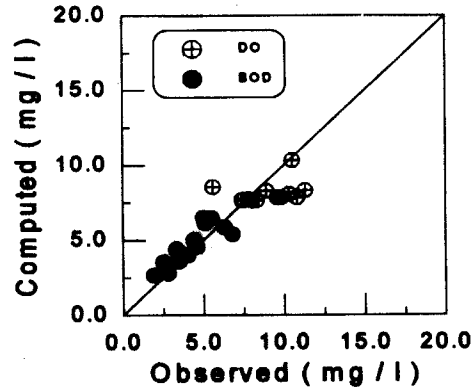


그림 7. 모형의 검증결과 ('96년 9월)

서 제시하고 있는 입력변수 불확실도의 범위에서 선택하였다. 표 3은 이러한 각 입력 매개변수에 대한 불확실도를 나타내고 있다. 이러한 매개변수들은 정규분포형을 가지며 서로 상관되지 않은 것으로 가정하였다.

본 QUAL2E-AFOSM 모형의 검증을 위하여 QUAL2EU에 있는 Monte-Carlo 기법을 이용하였다. 개발된 모형에 대해 검증에 사용될 Monte-Carlo 기법에서는 기준의 동일화를 위해 기본 입력변수 값들은 표 3에서의 값을 사용하였다. 사용될 모의수행의 수는 2,000회를 사용하였다. AFOSM 기법을 사용하여 계산된 결과는 QUAL2EU의 Monte-Carlo 기법을 이용한 평균, 표준편차, 그리고 분산계수와 비교한 결과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 수질 문제에서 주요 관심사가 되고 있는 환경 기준치를 초과할 초과확률을 구함으로써 환경기준치에 위배될 확률을 판단할 수 있도록 신뢰도 분석을 실시하였다. 여기서

표 3. 모형에 대한 입력 매개변수의 불확실도

No. of Uncertain Parameter	Group Name	Component	Distribution Type	C.O.V (%)
1	RXNC	BOD Decay Rate	Normal	25.00
2		BOD Settling Rate	Normal	25.00
3		SOD Rate	Normal	25.00
4	FFHW	Headwater Flow	Normal	5.00
5		HWTR-Temperature	Normal	3.00
6		HWTR-DO	Normal	10.00
7		HWTR-BOD	Normal	20.00
8	FFPL	Point Load Flow	Normal	5.00
9		PTLD-Temperature	Normal	3.00
10		PTLD-DO	Normal	10.00
11		PTLD-BOD	Normal	20.00

초과확률 즉 위험도는 출력변수의 농도가 어떤 기준 농도치를 초과할 확률을 말하며, DO의 경우는 이와 반대로 기준 농도치보다 낮을 확률을 의미한다.

Monte-Carlo 모의수행에 의한 초과확률 $(P_e)_{\text{Monte-Carlo}}$ 는 식 (8)과 같다.

$$(P_e)_{\text{Monte-Carlo}} = \frac{(Z < 0) \text{인 모의발생의 수}}{\text{전체 모의발생의 수}} \quad (8)$$

여기서 $Z=R-L$ 이며, R 은 식 (8)과 식 (9)에 대해 고정된 기준 농도치이다. L 은 모형에 의해 모의수행된 농도를 의미한다. 그리고 본 연구에서 개발한 QUAL2E-AFOSM 모형에 의한 초과확률 $(P_e)_{\text{AFOSM}}$ 은 식 (9)와 같다.

$$(P_e)_{\text{AFOSM}} = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (9)$$

$$\beta = \frac{E[R - \mu_o]}{\sigma_o} \quad (10)$$

여기서 σ_o 는 출력농도에 대해 예측된 표준편차이고, μ_o 는 출력농도에 대해 예측된 평균치이다. 그리고 $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포에 대한 누적분포함수이다.

본 연구모형에 대해서 표 3과 같은 조건에 대한 실제 하천에서의 환경 기준치에 대한 위험도를 살펴 보았다. 검토할 위치로는 남강 합류부와 물금 지점을 선정하였으며, 일반적으로 가장 중요한 수질항목으로 인정되는 DO와 BOD에 대해 수행되었다. 표 4는 DO와 BOD에 대한 남강 합류부 지점에서의 신뢰도 분석을 하였으며, 이에 대한 도해적인 제서를 그림 8에 나타내었다. 여기서 구한 추가확률곡선을 이용하여 AFOSM 기법, Monte-Carlo 기법에 대한 출력의 빈도분포를 얻을 수 있었다. 표 5에는 Monte-Carlo 기법에서 사용한

반복횟수 2,000회에 대한 BOD의 각 농도에서의 빈도수를 나타내고 있다. 표와 그림에서 알 수 있는 바와 같이 DO의 빈도 분포는 남강 합류부의 경우 3.9~6.9 mg/ℓ, 물금 지점에서는 3.7~6.2 mg/ℓ의 범위를 가지고 있었으며, BOD의 경우 남강 합류부에서는 3.55~7.35 mg/ℓ, 물금 지점에서는 2.1~5.7 mg/ℓ의 범위에서 나타남을 알 수 있었다. 지금까지 본 연구에서 개발한 QUAL2E-AFOSM 모형을 이용하여 Monte-Carlo 기법과의 검증을 실시하였으며, 낙동강 유역에서 여러 수질 농도에 대한 초과확률, 즉 신뢰도 분석을 실시하였다. 본 연구 결과를 기초로 하여 낙동강의 주요 지점에서 실제 환경기준치에 대한 위험도를 판단함으로써 목표하는 수질 기준을 달성하기 위하여 상류부의 댐 방류량의 조절이나 주요 오염원 및 지류로부터의 오염 농도를 규제하는 것과 같은 최적의 수질 관리대책을 수립할 수가 있을 것이다. 본 연구에서 새롭게 제안된 신뢰도 해석에 의한 수질관리기법은 낙동강 유역 뿐만 아니라 국내 다른 하천유역에도 적용된다면 현재 수량과 수질에 있어 크게 문제가 되고 있는 수자원의 수질관리에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

표 4. 남강합류부에서의 DO와 BOD에 대한 신뢰도 분석

Nonexceedance Probability of DO (%)			Exceedance Probability of BOD (%)		
Conc. (mg/ℓ)	AFOSM	Monte-Carlo	Conc. (mg/ℓ)	AFOSM	Monte-Carlo
3.5	0.00	0.05	3.55	99.93	98.65
3.7	0.00	0.05	3.75	99.79	97.60
3.9	0.02	0.10	3.95	99.44	95.90
4.1	0.09	0.40	4.15	98.64	93.80
4.3	0.36	1.30	4.35	97.13	90.05
4.5	1.24	3.05	4.55	94.09	86.25
4.7	3.60	7.05	4.75	89.31	81.05
4.9	8.84	11.95	4.95	82.36	75.05
5.1	18.35	20.30	5.15	73.14	67.60
5.3	32.56	31.90	5.35	62.17	58.75
5.5	49.96	47.60	5.55	50.24	49.35
5.7	67.37	62.65	5.75	38.48	42.30
5.9	81.65	75.35	5.95	27.79	33.55
6.1	91.23	85.40	6.15	18.92	25.05
6.3	96.46	92.80	6.35	12.14	18.75
6.5	98.81	96.65	6.55	7.33	13.60
6.7	99.67	98.80	6.75	4.16	9.40
6.9	99.92	99.65	6.95	2.28	6.20
7.1	99.99	99.90	7.15	1.13	4.00
7.3	100.00	100.00	7.35	0.55	2.30

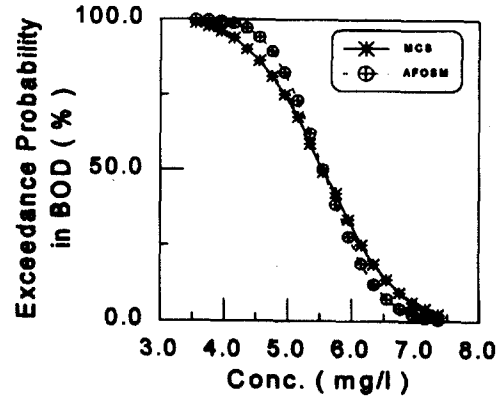
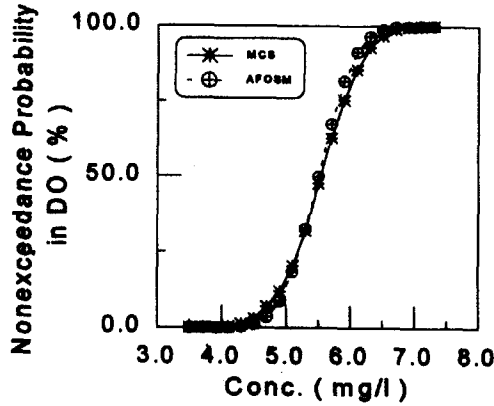


그림 8. 남강하류에서의 DO와 BOD에 대한 초과확률곡선의 비교

표 5. 물금 지점에서의 BOD에 대한 빈도분포 도표

Concentration (mg/l)	AFOSM		Monte-Carlo	
	Cumul.	Frequency	Cumul.	Frequency
< 2.1	2000	0	1996	4
2.1 ~ 2.3	2000	0	1989	7
2.3 ~ 2.5	1999	1	1969	20
2.5 ~ 2.7	1996	3	1934	35
2.7 ~ 2.9	1983	13	1870	64
2.9 ~ 3.1	1943	40	1776	94
3.1 ~ 3.3	1848	95	1644	132
3.3 ~ 3.5	1668	180	1467	177
3.5 ~ 3.7	1394	274	1255	212
3.7 ~ 3.9	1057	338	1041	214
3.9 ~ 4.1	714	342	814	227
4.1 ~ 4.3	428	287	599	215
4.3 ~ 4.5	226	202	425	174
4.5 ~ 4.7	105	121	275	150
4.7 ~ 4.9	43	62	157	118
4.9 ~ 5.1	16	27	87	70
5.1 ~ 5.3	5	11	43	44
5.3 ~ 5.5	2	4	21	22
5.5 ~ 5.7	0	1	10	11
5.7 <	0	0	0	10
Total		2000		2000

5. 결 론

본 연구는 낙동강 유역에서의 신뢰도 해석에 의한 수질예보시스템을 개발하기 위해서 QUAL2E-AFOSM 모형을 개발하고 이를 적용한 것이다. 낙동강의 왜관-물금 구간의 부동류 해석을 통하여 수리학적 특성인자를 도출하였다. 주요 반응계수들에 대해 BFGS 기법에 의한 최적 반응계수를 산정하여 모형의 보정과 검증을 실시하였으며, 계산 결과는 실측자료와 비교적 잘 일치

하고 있었다.

본 연구에서는 하천 수질해석에서 표준적으로 적용되고 있는 QUAL2E 모형에 AFOSM 기법에 의한 불확실도 해석을 실시하여 새로운 모형을 개발하였고 이를 낙동강 유역에 적용하였다. AFOSM 기법을 이용한 모형과 QUAL2EU의 Monte-Carlo 기법에 대해 주어진 지점에서 수질변수의 초과확률분포곡선과 수질농도에 대한 빈도분포도를 계산하여 제시하였으며, 두 기법은 비교적 합리적인 범위내에서 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 개발한 QUAL2E-AFOSM 모형은 기존의 QUAL2E-UNCAS 모형과 더불어 추계학적 하천 수질관리에 응용될 수 있을 것으로 사료되며, 국내 주요 하천유역에 적용되어 과학적인 수질관리 대책수립에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 1996년도 한국학술진흥재단의 지역개발연구과제에 의한 연구결과로서 지원당국에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설부. (1991-1993). 낙동강 하천정비 기본계획, 보완 II, III.
- 백경원, 김상호, 한건연, 송재우. (1995). "QUAL2E에 의한 한강 하류부에서의 수질해석." 대한토목학회논문집, 제15권, 제2호, pp. 451-461.
- 전경수, 이길성. (1993). "영향계수를 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정." 대한토목학회논문집, 제13권, 제4호, pp. 163-176.
- 조홍제, 한건연, 김상호. (1996). "낙동강 하류부에서

- 의 오니준설에 따른 수질영향분석.” 한국수자원 학회지, 제29권, 제3호, pp. 177-186.
- 한건연, 이상식, 김상현, 김홍대. (1994). “낙동강 중류 부에서의 확정론적 수질해석.” 한국수문학회지, 제26권, 제5호, pp. 53-67.
- 한건연, 김상현, 박재홍. (1995a). “하천수질변동의 예측을 위한 추계학적 수질해석모형의 개발.” 한국수자원학회지, 제28권, 제2호, pp. 103-113.
- 한건연, 송재우, 김상호, 백경원. (1995b). “한강하류 부에서의 총질소와 총인에 대한 수질모의.” 한국수자원학회지, 제28권 제4호, pp. 137-146.
- 환경부 (1996). 환경통계연감.
- Ang, A.H., and Tang, W.H. (1984). *Probability concepts in engineering planning and design*. Volume II, John Wiley & Sons.
- Brown, R.T., and Barnwell, T.O. (1987). *Computer program documentation for the enhanced stream water quality model QUAL2E and QUAL2E-UNCAS*. EPA/600-3-87/007, US Environmental Protection Agency.
- Burger, S.J., and Lettenmaier, D.P. (1975). “Probabilistic methods in stream quality management.” *Water Resources Bulletin*, Vol. 11, No. 1, pp. 115-130.
- Canale, R.P., and Seo, D.I. (1996). “Performance, reliability, and uncertainty of total phosphorous models for lakes-II, Stochastic analysis.” *Water Research*, Vol. 30, No.1, pp. 95-102.
- HEC (1994). *HEC-2 User's Guide*. Haestad Methods.
- Kothandaraman, V., and Ewing, B.B. (1969). “A probabilistic analysis of DO-BOD relationships in stream.” *J. of Water Pollution Control Federation*, Vol. 41, No. 2, pp. R73-R90.
- Marr, J.K., and Canale, R.P. (1988). “Load allocation for toxics using Monte-Carlo techniques.” *J. of Water Pollution Control Federation*, Vol. 60, No. 5, pp. 659-666.
- Mays, L.W., and Tung, Y.K. (1992). *Hydro-systems engineering and management*. McGraw-Hill.
- McDonnell, A.J., Chadderton, R.A., and Miller, A.C. (1982). “Uncertainty analysis of dissolved oxygen model.” *J. of Environmental Engineering Division*, ASCE, Vol. 198, No. EE5, pp. 1003-1011.
- Melching, C.S., and Anmangandla, S. (1992). “Improved first-order uncertainty method for water-quality modeling.” *J. of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 5, pp. 791-805.
- O'Connor, D.J. (1960). “Oxygen balance of an estuary.” *J. of Sanitary Engineering Division*, ASCE, Vol. 86, No. SA3, pp. 35-55.
- O'Connor, D.J., and Di Toro, D.M. (1970). “Photosynthesis and oxygen balance in streams.” *J. of Sanitary Engineering Division*, ASCE, Vol. 96, No. SA2, pp. 547-571.
- Rackwitz, R. (1976). *Practical probabilistic approach to design*. Bulletin No. 112, Comite European du Beton, Paris, France.
- Rackwitz, R., and Fiessler, B. (1977). *Non-normal distributions in structural reliability*. SFB 96, Report 29, Technical University of Munich, pp. 1-22.
- Scavia, D., Powers, W.F., Canale, R.P., and Moody, J.L. (1981). “Comparison of first-order error analysis and Monte-Carlo simulation of time-dependent lake eutrophication models.” *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 4, pp. 1051-1059.
- Streeter, H.W., and Phelps, E.B. (1925). *A study on the pollution and natural purification of the Ohio river, III. Factors concerning the phenomena of oxidation and reaeration*. U.S. Public Health Service, Public Health Bulletin, No. 146.
- Tung, Y.K., and Hathhorn, W.E. (1988). “Assessment of probability distribution of dissolved oxygen deficit.” *J. of Environmental Engineering*, ASCE, Vol.

- 114, No. 6, pp. 1421-1435.
- Walker, W.W. (1982). "A sensitivity and error analysis framework for lake eutrophication modeling." *Water Resources Bulletin*, Vol. 18, No. 1, pp. 53-60.
- Warwick, J.J. (1989). "Interplay between parameter uncertainty and model aggregation error." *Water Resources Bulletin*, Vol. 25, No. 2, pp. 275-283.
- Warwick, J.J., and Canale, W.G. (1986). "Effect of parameter uncertainty in stream modeling." *J. of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 3, pp. 479-489.

〈최종본 도착일 : 1997년 8월 5일〉