

낙동강 유역에 대한 일별 유달부하량 산정모델개발 I. 모델식의 보정 및 검증

윤 영 삼 · 김 문 수 · 유 재 정 · 이 혜 진 · 이 준 배 · 양 상 용
국립환경과학원
(2006년 10월 23일 접수; 2006년 12월 8일 채택)

Development of the Estimation Model on Daily Pollutant Loads for the Watersheds in the Nakdong River Basin I. Correction and Verification for the Model

Young-Sam Yoon, Moon-Soo Kim, Jae-Jung Yu, Hae-Jin Lee,
Jun-Bae Lee and Sang-Yong Yang

National Institute of Environmental Research, Goryeong 717-873, Korea
(Manuscript received 23 October, 2006; accepted 8 December, 2006)

The delivery load data obtained from Nakdong river basin are used for developing the model estimating the daily delivery load on the main side streams of Nakdong River. The developed model assesses the daily contamination loads of the main thirteen side streams that contribute to the main stream of Nakdong river. It is developed that the model using the simplified equation that can estimate the daily delivery loads on the side main streams of Nakdong river for a period of having no data of the water quality and flow. The developed model for estimating the daily delivery loads from the main side streams in Nakdong river basin on each item such as BOD, TN, and TP is expressed as Daily delivery load ($\frac{kg}{day}$) = Production load ($\frac{kg}{day}$) \times (1 - α) \times ($\frac{\text{daily runoff}}{\text{average runoff per year}}$)^r. The estimated values obtained by using the model are almost fit to the calculated values (real data) that have been acquired from the thirteen main side streams in Nakdong river basin. The correlation coefficient values, R, that indicate the correlation between the estimated and the calculated show over 0.7 that mean the estimated values from the used model are adapted to the real data except TN values of Nam-river, Hwang-river, Gam-river, We-river. Especially, the correlation of TP values between the estimated and the calculated implies quite a creditable data to use.

Key Words : Daily delivery loads, Model, Daily runoff, Production loads

1. 서 론

낙동강은 물론 우리나라 하천들이 현재 당면하고 있는 가장 심각한 문제는 수량부족과 수질악화로 인한 물 문제로 근본적으로 이러한 모든 문제의 원인은 하천오염에서 기인된다. 낙동강을 포함 우리나라 하천의 대부분은 오염원이 중류와 상류에 집중되어 있어 오염원 관리에 취약하고 도시화와 산업화의 진전에 따라 물 수요는 점차 늘어나 총강수량의 23%를 사용하고 있으며, 특히 갈수기 때

에는 하천수의 47%가 생활하수 및 산업폐수로 구성되어 있는 등 환경용량이 매우 열악한 실정이다. 뿐만 아니라 하천의 최소·최대 유량 비율인 하상계수가 300~500으로 유럽(10~30) 이나 일본(40~50)보다 매우 커서 효과적인 물 자원 관리가 상대적으로 어려운 편이다. 이와 같이 우리나라 하천들은 오염원 배치, 환경용량, 하천유하 특성상 하천관리에 대단히 취약한 하천구조를 가지고 있다 (박규석, 1997).

본 연구의 대상인 낙동강 유역 역시 높은 하상계수는 물론 하구에 독이 축조되어 강우가 풍부한 여름철 한때를 제외하고는 심한 정체 현상을 일으켜 호소성 하천의 특징을 나타내고 있는 실정이다.

Corresponding Author : Young-Sam Yoon, National Institute of Environmental Research, Goryeong 717-873, Korea
Phone: +82-54-950-9711
E-mail: ysyoons3@me.go.kr

위와 같은 문제점을 가지고 있는 낙동강 유역의 각 소수계로 유달되는 오염물질의 원인은 크게 두 가지로 구분하여 생각할 수 있다. 즉 점 및 비점 오염원으로부터 기인되는 오염물질을 말하는 것으로, 첫째 점 오염물질의 하천으로의 부하이다. 이는 가정 또는 공장 등에서 발생된 오염물이 1차적인 인공적 처리과정 즉 농공단지폐수종말처리시설, 공단폐수종말처리시설, 축산폐수처리시설, 하수종말처리시설, 분뇨처리시설 등의 처리과정을 거쳐 하수관거 등을 통해 하천으로 유입된다. 유입된 오염물질은 하천에서 자연적인 자정과정을 거쳐 지천 등을 통해 본류 또는 호소로 유입된다. 둘째 비점 오염물질의 하천으로의 부하이다. 이는 산지의 영양물질 또는 농촌 유역에서 농작물 재배 시 비료, 퇴비의 시비 등에 의해 토양이나 농작물에 흡수되지 못한 영양염류가 유역에 내린 강우 등에 의해 하천으로 유입되는 것을 생각할 수 있다. 따라서 일별 유달부하량 산정을 위한 모델개발은 유역에서 발생된 이러한 하천 오염물질이 증감과정을 거치면서 최종적인 연구대상인 낙동강 유역 소수계 내에 어느 만큼의 양이 도달되는지를 단순화된 하지만 정확한 모델을 통해 예측하는데 본 연구의 목적을 두었다. 물론 유달부하량은 수질과 유량조사만을 가지고도 그 정량적인 양을 알 수 있다. 그러나 유량과 수질을 매일 조사한다는 것은 시간과 비용이 많이 소모됨으로 최소한의 인력, 시간, 비용을 들여 수질과 유량을 측정하고 이러한 실측된 자료를 이용하여 유달부하량 산정모델을 개발하였다(윤영삼 등, 2003). 이러한 모델개발을 통해 유량, 수질 측정 회수를 최소화하여 낙동강 유역내 소수계에 대한 일별 오염부하정도를 정밀하게 평가하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 낙동강수계 수질오염 및 유량 조사

2.1.1. 수질오염

수질조사 분석은 수질오염공정시험방법 및 Standard Methods에 준하여 실시하였다. 조사항목은 유량, 수온, pH, DO, Cond., SS, BOD, COD, TN, TP 등의 항목에 대하여 실시하였다. 조사항목 중 수온, pH, DO 및 Cond.는 현장에서 직접 측정하였으며, 나머지 항목은 실험실로 운반하여 분석하였다.

낙동강 본류와 유입천의 수질조사 지점은 낙동강본류 11개 지점, 지천 18개 지점 등 29개 지점이 있었다. 수질조사는 시기별로 지점에 있어서는 약간의 차이가 있지만 2001년 11회, 2002년 12회, 2003년 12회 실시하였다.

2.1.2. 유량

하천유량은 단위시간에 어느 횡단면을 통과하는 물의 양으로 시간에 따라 변화되며, 수위는 낙차공이나 댐의 상·하류에서는 불연속적이지만 유량은 상류에서 하류에 연속된 양으로 관측된다.

수자원계획을 위해서는 장기간 유량변화를 알아야 하며, 이수계획에서는 갈수시의 유량 관측 자료가 필요하고, 치수계획을 위해서는 홍수시의 유량 관측 자료가 필요하다. 그러나 유량관측은 우량이나 수위와 같이 연속관측이 곤란하기 때문에 관측치가 한정되어 있다.

일반 하천에서는 수위와 유량 사이에 특정관계가 성립되며 유량을 산출하는 중요한 수단으로 수위 유량 곡선식을 작성하여 활용하고 있다. 신뢰성 있는 수위 유량 곡선을 구하기 위해서는 유량 측정 장소, 회수 및 방법이 적절해야 하고, 정확한 유량 조사를 하기 위해서는 첫째 정확한 통수 단면적 둘째 측정에 필요한 기구의 선택 및 정확성, 셋째 측정자의 숙련성이 중요한 요소이다.

수위와 유량이 안정된 관계를 유지하기 위해서는 하천의 합류점이나 발전소의 방류로 인한 수위 변동이 심한 곳은 피하고 하상의 변동이 없는 직선구간의 하천에 관측소를 설치해야 한다. 대부분 하도에서는 하상침몰의 계절적인 성장과 배수 영향 그리고 하상 및 수표면 변화 등으로 인하여 수위-유량관계가 자주 변하게 된다. 그러므로 수위-유량관계의 변화에 대응하기 위해서는 정기적인 측정이 필요하며 모든 범위의 수위에 대한 수위-유량곡선을 정의하기 위해서는 많은 회수의 측정이 필요하다. 그러나 자연하천에서 정확하게 유량을 측정하려면 장기적인 관측, 유량 관측 시설의 확충, 특히 고수시 유량측정 설비 등이 선행되어야 하므로 많은 어려움이 있다(하천시설기준, 1995).

신뢰성 있는 유량측정 방법을 획득하기 위해서는 적절한 수위 및 유량측정 지점의 선정과 정확한 유속 및 통수단면적의 측정이 이루어져야 한다. 유속 측정과 유량계산에는 대상위치, 목적 등에 따라 다양한 방법이 사용되고 있다.

본 연구에서는 유입지천의 유량은 유황이 일정하고 상태가 고른 지점을 선정하여 물이 흐르는 방향과 직각이 되도록 하천의 양끝을 고정하고, 등간격으로 측정점을 정하여 하천 단면적을 구하고 수심 및 유속계를 이용 하천의 평균 유속을 측정하였고, 유량은 중간단면적법을 이용하여 유속과 단면적의 곱으로 유량을 측정하였다. 유속계는 소하천의 경우 영국 VALEPORT 사의 회전식 유속계(Model BFM002)를 사용하였고, 대하천의 경우 일

본 알렉 전자주식회사의 전자식유속계(Model ACM 210- D)를 사용하였다.

2.1.3. 낙동강유역 주요지천에 대한 일유출량산정 유역에서의 수문순환과정을 정량적으로 표현해 줄 수 있는 도구가 바로 수문현상이다. 수문모형은 주로 수학적인 모형으로써 크게는 확정론적인 모형과 추계학적인 모형으로 나눌 수 있다. 추계학적인 모형은 기존의 장기간에 걸쳐 수립된 수문자료를 이용 통계 등의 수학적인 해석을 통해 미래의 발생가능한 수문량을 예측하는데 반해, 우리나라의 경우 소유역에서의 수문관측 자료가 거의 없는 실정이고, 장차 모든 소유역에 막대한 비용을 들여 시설을 하고 자료를 수립한다는 것은 비경제적이라 할 수 있으므로 우리나라에서는 비교적 풍부한 기상자료를 이용 수문량을 산정해 낼 수 있는 확정론적 모형들이 많이 사용되어 왔으며 앞으로도 이러한 방향으로 지향해야 할 것으로 생각된다(오규창, 1991).

본 연구에서는 우리나라의 강우와 지형특성을 고려한 일 유출량 모형인 DAWAST모형을 통해 산정된 기존의 결과를 유역별로 분석하여 각 하천 유역별 유출량을 강우량에 대해 약 60% 유출된다고 가정하여 이들 값을 유역면적에 따른 배분율을 적용하여 대상 하천 유역에 대한 일 유출량을 산정하였다김태철, 1986).

2.1.4. 일별 유달부하량 추정 모형개발

본 연구에서 개발하고자 하는 유달부하량 예측 수식은 유역에서 발생된 하천오염물질이 증감과정을 거치면서 최종적인 연구대상인 호소 또는 큰 하천(즉 본류)에 어느 만큼의 양이 도달되는지를 단순화된 수식개발을 통해 예측하는데 목적을 두었다. 물론 유달부하량은 수질과 유량조사만을 가지고도 그 정도를 알 수 가능하다. 그러나 유량과 수질을 매일 조사한다는 것은 시간과 비용이 많이 소모되므로 최소한의 인력, 시간, 비용을 들여 수질과 유량을 측정하고 이러한 실측된 자료를 통해 예측 수식 개발을 통해 유량, 수질 측정회수를 최소화하는 것이 이 모델식 개발의 목적이라 할 수 있다.

이러한 예측수식 유도 기본 개념은 앞에서 언급했듯이 어떻게 점과 비점오염물질의 하천으로의 유입과정을 수식화 하느냐에 있다. 수식화를 위해서는 자연계에서 일어나는 자연현상을 개념화하여 수학적인 수식으로 표현하여야 한다. 따라서 유달부하량은 먼저 점과 비점을 나누어 식 (1)과 같은 수학적인 개념으로 수식화 할 수 있다.

$$\text{BOD, TN, TP 유달부하량} = f(\text{유역에서 발생된 점오}$$

$$\text{염물질의 량, 비점오염물질의 량}) \quad (1)$$

여기서, a=유역에서 발생된 점 오염물질의 양, b=비점 오염물질의 양이라 두면 식(1)은 아래의 식(2)와 같이 단순화하여 표현할 수 있다.

$$\text{BOD, TN, TP 유달부하량} = f(a, b) \quad (2)$$

여기서 다시 “a” 와 “b”는 아래 식(3)와 (4)과 같은 수학적인 수식으로 개념화 할 수 있다.

$$a = f(\text{유역에서 발생된 총 점 오염물질의 양, 농공단지폐수종말처리시설의 처리율, 공단폐수종말처리시설의 처리율, 축산폐수처리시설의 처리율, 하수종말처리시설의 처리율, 분뇨처리시설의 처리율 등의 인공적인 처리율과, 하천 등의 자연적인 자정작용}) \quad (3)$$

$$b = f(\text{유역에서 발생된 총 비점 오염물질의 양, 유역의 토지이용인자, 수문지질인자, 지형인자, 토양인자 등}) \quad (4)$$

결국 일별로 유달부하량을 예측하기 위해서는 위와 같은 많은 항목들이 각 유역에 대해 조사되어야 한다. 그러나 수식은 정확한 실측치를 대변하면서 단순화 할 수 있다면 단순한 수식으로 표현하는 것이 모델식의 운용에 유리함으로 위와 같은 개념적인 복잡한 상황을 단순화시키기 위한 작업이 필요하다.

먼저 식(3)의 “a” 인자는 유역에서 발생된 전체 오염물질량이 “1” 이라고 가정하면 위의 식(3)의 “a”항의 복잡한 함수관계는 단순히 처리율과 하천의 자정능에 따라 아래 식(5)로 단순화시켜 나타낼 수 있다.

$$a = f(\text{점 오염물질 총발생량, } 1 - \alpha) \quad (5)$$

여기서, a는 처리율과 하천 및 유역의 자정능 등이 포함된 값이다.

식(4)의 “b”항 역시 각 항목은 유출모델의 수식화에 포함된 인자로서 결국 b는 일유출량의 함수가 된다. 따라서 식(4)는 간단히 아래와 같이 식(6)로 나타낼 수 있다.

$$b = f(\text{비점 오염물질 총발생량, 일유출량 } \gamma) \quad (6)$$

식(6)의 “b”항이 일유출량의 지수승에 비례하는 것은 유달부하량은 그동안의 많은 연구를 통해 유량과는 지수승의 비례관계가 성립하는 것으로 조사되었기 때문에 유달부하량 역시 실측의 경우 유

량과 수질의 단순한 곱을 통해 구하므로 유달부하량 역시 지수승에 비례하는 것으로 가정하였다 (Gunnerson, 1967; 田淵侯雄, 1993).

따라서 두식을 연결시켜 위의 유달부하량에 대한 개념적인 절차를 통합하여 표현하면 아래 식(7)로 표현할 수 있다.

$$\text{일별 유달부하량} = f(\text{점 오염물질 총발생량} + \text{비점 오염물질 총발생량} \cdot (1 - \alpha) \cdot \text{무차원 일 유출량}^\gamma) \quad (7)$$

그러므로 최종적으로 일별 유달부하량 예측수식의 함수관계는 아래 식(8)과 같이 단순화시켜 나타낼 수 있다.

$$\text{일별 유달부하량} = \text{유역총발생부하량} \times (1 - \alpha) \times (\text{무차원 일유출량})^\gamma \quad (8)$$

여기서, 무차원 일유출량 = β /연평균 일유출량, β = 일유출량

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질특성

낙동강 본류 상·중·하류 유역 및 본류 직유입 하천들의 수질 오염도를 평가하기 위하여 2001 ~ 2003년까지의 수질조사 결과를 년 평균하여 낙동강 유역 주요지천과 본류 주요지점을 대상으로 유달부하량 평가대상 항목인 BOD, TN, TP에 대하여 조사하였다(조태웅, 2001, 양상용, 2002).

3.1.1. 생물화학적산소요구량(BOD)

Table 1에 낙동강 본류 주요지점과 본류 직유입 주요지천의 BOD 값을 년 평균하여 수록하였다. Table 1에 수록 된바와 같이 금호강과 남강의 경우 2001년에 비해 2003년의 BOD 값이 감소하였으며, 특히 낙동강 하류권의 서부 지역에 위치한 남강의 경우 2001년 BOD 3.1 mg/L, 2002년 2.6 mg/L, 2003년 2.1 mg/L로 해마다 BOD 값이 감소하는 경향을 보였다. 상류의 내성천의 경우 2001년, 2002년, 2003년의 년평균 BOD 값이 2003년에 가장 높은 값을 보였다. 그러나 상류권의 위천과 중류권의 황강은 연도별 경향은 없었으나 낙동강 유역 기타 지천에 비해 비교적 BOD 값이 낮은 경향을 보였다. 본류 주요지점의 경우 왜관, 고령, 남지, 물금 등 거의 모든 지점에서 2001년에 비해 2003년의 BOD 값이 감소하는 경향을 보였으며, 특히 고령지점의 경우 고령지점에 직접적으로 영향을 미치는 금호강의 수질개선에 기인 해마다 수질이 개선되는 것으로 조사되었다. 연도별 고령 지점

Table 1. Yearly average water quality for Nakdong river basin

Items (Yearly Ave.)	Year	Branch Streams				
		Naesung chun	Wee chun	Keum hogang	Hwang gang	Nam gang
BOD (mg/L)	2001	1.0	1.5	5.0	1.3	3.1
	2002	1.1	1.7	3.4	0.9	2.6
	2003	1.6	1.6	3.7	1.5	2.1
TN (mg/L)	2001	2.663	2.859	9.631	2.240	2.859
	2002	3.810	4.555	8.881	1.967	3.019
	2003	3.832	4.546	7.715	1.897	3.779
TP (mg/L)	2001	0.048	0.024	0.725	0.047	0.126
	2002	0.065	0.066	0.420	0.056	0.093
	2003	0.108	0.078	0.398	0.048	0.137
Items (Yearly Ave.)	Year	Main Streams				
		Poonggi	Wae kwan	Kor ryung	Nam gee	Mool keum
BOD (mg/L)	2001	1.1	2.4	3.8	3.3	3.3
	2002	1.1	1.8	3.2	2.9	2.8
	2003	1.5	2.0	2.8	2.7	2.7
TN (mg/L)	2001	2.556	3.299	5.107	3.616	3.238
	2002	2.994	4.051	5.806	4.149	3.885
	2003	2.527	3.147	3.951	3.675	3.304
TP (mg/L)	2001	0.048	0.110	0.314	0.152	0.137
	2002	0.058	0.097	0.188	0.128	0.112
	2003	0.112	0.115	0.201	0.126	0.135

의 BOD 값의 변화경향을 살펴보면 2001년 3.8 mg/L, 2002년 3.2 mg/L, 2003년 2.8 mg/L로 수질이 개선된 것으로 조사되었다.

3.1.2. 총 질소(Total Nitrogen, TN)

낙동강 주요지천 및 본류 주요지점의 년 평균 TN 농도는 Table 1에 수록 된 바와 같이 BOD와는 다른 경향을 보였으나, 금호강의 경우 2001년 9.631 mg/L, 2002년 8.881 mg/L, 2003년 7.715 mg/L로 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 낙동강 유역 주요 지천의 TN은 금호강을 제외하고는 연도별 특별한 상관성을 보이지는 않았다. 낙동강 유역 주요지천의 TN값은 상류의 내성천과 황강에서 비교적 낮은 값을 보인 반면 대구광역시 도시권을 관류하는 금호강의 TN값이 과거에 비해서는 낮아졌지만 낙동강 유역권의 지천들 중에서는 가장 높은 TN 값을 보였다.

낙동강 유역 주요지천의 TN 값은 금호강을 제

의하고는 1.897 mg/L(2003년 황강) ~ 4.215 mg/L(2002년 위천)의 값을 보였다. 낙동강 본류 주요지점의 경우 고령과 남지 지점의 TN 값이 각각 2001년 5.107 mg/L, 3.616 mg/L, 2002년 5.806 mg/L, 4.149 mg/L, 2003년 3.951 mg/L, 3.675 mg/L로 대단히 높은 값을 보였다. 반면 상류에 위치한 풍지 지점의 경우 2001년 2.556 mg/L, 2002년 2.994 mg/L, 2003년 2.527 mg/L로 비교적 낮은 값을 보였다.

본 논문의 본문에 수록하지는 않았지만 시기별 TN 값을 살펴보면 특별한 계절적인 특징을 보이지는 않았지만 대체로 유량이 적었던 갈수기에 높고 유량이 풍부한 풍수기에 다소 낮아지는 경향을 보였다.

3.1.3. 총인(Total Phosphorus, TP)

낙동강 본류 주요지점 및 지천들에 대한 연도별 평균 TP 농도 조사결과는 Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 금호강과 남강의 TP 값이 대단히 높게 조사되었다. 이들 하천의 연도별 TP 값을 살펴보면 금호강이 2001년 0.725 mg/L, 2002년 0.420 mg/L, 2003년 0.398 mg/L의 값으로 금호강의 경우 지속적으로 수질이 개선되고 있는 것으로 나타났다. 남강의 경우 2001년 TP 농도 0.126 mg/L, 2002년 0.093 mg/L, 2003년 0.137 mg/L로 2002년 다소 낮은 TP 값을 보였다. 반면 상류에 위치한 위천의 경우 2001년 0.024 mg/L, 2002년 0.066 mg/L, 2003년 0.078 mg/L로 낙동강 유역 중·하류권의 하천들에 비해서는 낮은 값을 보였지만 낙동강 상류 지천들 역시 대단히 높은 TP 농도를 보였다.

낙동강 본류 주요지점의 경우 낙동강 상류의 풍지교에서 각각 2001년 0.048 mg/L, 2002년 0.058 mg/L, 2003년 0.112 mg/L로 2001년과 2002년의 경우 비교적 낮은 값을 보였으나 2003년 TP 값이 비이상적으로 높은 농도를 보였다. 낙동강 본류구간 역시 지천과 마찬가지로 대단히 높은 TP 농도를 보였다. 특히 구미공단의 공장폐수 및 생활하수의 직접적인 영향을 받는 왜관 지점에서 2001년 0.110 mg/L, 2002년 0.097 mg/L, 2003년 0.115 mg/L로 TP 값이 증가하다 대구광역시와 성서공단 등의 영향을 직접적으로 받는 고령지점의 TP 값이 2001년 0.314 mg/L, 2002년 0.188 mg/L, 2003년 0.201 mg/L로 대단히 높은 농도를 보였다. 그러나 낙동강 본류 지점의 경우 이와 같이 왜관에서 TP 농도가 높아지기 시작하여 낙동강 중류권의 고령에서 최대값을 보이다 하류로 진행됨에 따라 하천의 자정작용과 비교적 수질이 양호한 회천, 황강 등의 유입에 의해 다소 낮아지는 경향을 보였다.

또한 TN과 마찬가지로 낙동강 유역 주요지천 및 본류 주요 지점들의 TP값은 뚜렷한 계절적인 변동양상을 보이지는 않았다.

3.2. 낙동강 본류 및 주요지천의 유량특성

본 연구에서 낙동강 본류 및 지천의 유량은 유황이 일정하고 상태가 고른 지점을 선정하여 물이 흐르는 방향과 직각이 되도록 하천의 양끝을 고정하고, 등 간격으로 측정점을 정하여 하천 단면적을 구하고 수심 및 유속계를 이용 하천의 평균 유속을 측정하였고, 유량은 중간단면적법을 이용하여 유속과 단면적의 곱으로 유량을 산정 하였다. 유속계는 하천의 수심이 낮아 직접 사람이 들어갈 수 있는 지점의 경우 영국 VALEPORT사의 회전식 유속계를 사용하였으며, 낙동강 본류와 같이 수심이 깊은 지점은 교량 위에서 대하천용 일본 알렉 전자주식회사의 전자식유속계를 사용하여 유속을 측정하였다.

이와 같은 방법으로 측정된 조사대상 하천들에 대한 월 별 유량측정 결과를 강우가 많았던 7 ~ 10월이 비교적 유량이 풍부하였으며, 우리나라 하천의 전형적인 특징인 갈수기와 풍수기 유량의 심한 불균형 현상인 높은 하상계수가 본 조사에서도 나타났다.

지천 유량의 경우 남강에서 유량이 가장 많았으며, 다음으로 황강, 밀양강, 금호강에서의 유량이 비교적 풍부하였다. 또한 본류의 유량은 하류로 진행됨에 따라 지천에서 유입되는 유량에 의해 증가하였다.

2001년의 지점별 년 평균 유량을 살펴보면 낙동강 상류 풍지교 지점에서 34.4 CMS로 적은 유량을 보인 본류 지점이 하류로 진행됨에 따라 내성천, 금호강, 회천, 황강, 남강 등에서 월 평균 6.2, 19.6, 15.8, 32.2, 39.3 CMS의 유입으로 인해 낙동강 하류인 수산교 지점에서 212.1 CMS로 증가하였다.

2001년의 유량을 월별로 살펴보면 시기에 관계없이 상류에서 하류로 진행됨에 따라 본류의 유량이 증가하였으며, 2001년 봄철 극심한 가뭄현상에 의해 12, 2, 3월에 비해 4 ~ 6월의 유량이 적었으며, 7 ~ 8월 다소 유량이 증가하였으나, 9 ~ 11월로 진행됨에 따라 다시 유량이 감소하였다.

2002년의 지점별 년 평균 유량을 살펴보면 2001년과 유사하게 낙동강 상류 풍지교 지점에서 78.2 CMS로 적은 유량을 보인 본류 지점이 하류로 진행됨에 따라 내성천, 금호강, 회천, 황강, 남강 등에서 월 평균 25.7, 29.0, 21.6, 39.4, 46.1 CMS의 유입으로 인해 본 연구의 유량측정 최말단 지점인 삼랑진의 평균 유량이 382.2 CMS로 증가하였다. 2001년과 2002년의 유량을 비교하면 2002년의 유량이

2001년에 비해 대단히 많은 양이 증가하였으며, 이는 2001년의 강수량에 비해 2002년의 강수량이 증가된 결과에 기인한다. 2002년의 유량을 월별로 살펴보면 시기에 관계없이 상류에서 하류로 진행됨에 따라 2001년과 동일하게 본류의 유량이 증가하였으며, 특히 2002년의 경우 8월과 9월의 유량이 대단히 많았다. 예를 들면 낙동강 상류 풍지교 지점의 유량이 2001년 8월, 9월 각각 52.2, 30.1 CMS에 불과하였지만 2002년 8월과 9월의 경우 각각 206.2, 373.5 CMS로 대단히 많은 유량을 보였다. 2002년 낙동강 유역 주요지천의 월별 유량역시 2001년에 비해서는 많았으며 본류와 마찬가지로 8월과 9월의 유량이 특히 많았다. 반면 2002년 1월~5월, 12월의 유량은 여름철 강우 집중기에 비해 대단히 낮은 값을 보이므로 한국하천의 전형적인 특징인 높은 하상계수를 본 조사에서도 확인할 수 있었다.

2003년의 지점별 년 평균 유량을 살펴보면 2001년, 2002년에 비해서는 대폭 증가된 유량 값을 보였으며, 낙동강 상류 풍지교 지점에서 도 연평균 145.3 CMS로 대단히 많은 유량을 보였으며, 본류 지점이 하류로 진행됨에 따라 내성천, 금호강, 회천, 황강, 남강 등 비교적 풍부한 유량을 가진 지천의 유입에 의해 본 연구의 유량측정 최말단 지점인 수산교의 평균 유량이 640.0 CMS로 증가하였다. 2001년과 2002년에 비해 2003년의 유량이 본류 수역은 물론 지천의 경우 모두 높은 유량을 보였다.

1999~2003년의 낙동강 본류 및 주요지천에 대한 일유출량 산정을 통한 일별로 추정된 유량결과를 내성천, 위천, 금호강, 황강, 남강 등 5개 낙동강 유역 주요지천과 본류 풍지교와 고령 지점에 대해 년 평균하여 살펴보면 조사대상 모든 지천에서 2001년의 평균 유량이 가장 낮게 나타났다. 낙동강 유역 주요지천들의 유량은 특히 금호강과 남강에서 풍부한 유량을 보였다. 본류의 경우 지천과 마찬가지로 2001년의 유량이 가장 낮게 나타났으며, 특히 2003년의 유량이 가장 높게 나타났다.

3.3. 모델의 보정 및 검증

본 연구에서 개발된 일별 유달부하량 예측 수식은 강우의 유역면적에 따른 일별 배분율을 적용 대상유역에 대해 산정된 일별 유출량 자료를 이용하여 수질과 유량을 측정하지 않고 일별 유출량 자료만을 독립변수로 하여 일별 대상 하천에 대한 유달(유입)부하량을 추정하는 수식이다. 이와 같이 단순화된 일별 유달부하량 예측 수식은 오염물질 역시 물과 같이 유출된다고 가정하여 대상 유역권의 BOD, TN, TP 등에 대한 유달부하량을 실측하고,

실측된 자료에 대한 시행오차법으로 각각의 수질 성분 및 유역권에 대한 매개변수를 보정하여 예측 모형으로부터 일별 유달부하량을 예측한다. 위의 식 (8)을 항목별로 다시 쓰면 식 (9)~(11)로 다시 쓸 수 있다.

$$BOD\left(\frac{kg}{day}\right) = BOD\text{발생부하량} \times (1-\alpha) \left(\frac{\text{일유출량}}{\beta}\right)^\gamma \quad (9)$$

$$TN\left(\frac{kg}{day}\right) = TN\text{발생부하량} \times (1-\alpha) \left(\frac{\text{일유출량}}{\beta}\right)^\gamma \quad (10)$$

$$TP\left(\frac{kg}{day}\right) = TP\text{발생부하량} \times (1-\alpha) \left(\frac{\text{일유출량}}{\beta}\right)^\gamma \quad (11)$$

위의 수식 식 (9)~(11)에 포함된 상수 “ α ”는 발생된 오염물질의 토양침투, 토양흡착, 식물흡수, 자연에 의한 자정작용, 각종 처리시설에 의한 처리 효율 등이 종합적으로 고려된 상수로 실측치에 대한 시행오차법을 통해 유역별, 항목별로 추정해야 하며, “ β ”는 2002년 일별 유출량의 년 평균값으로 단위는 강우량과 동일한 단위인 mm의 단위를 가지고 있으며 유역별로는 다를 수 있지만 항목에 관계없이 일정한 상수이다. 그리고 “ γ ”는 유달부하량을 실측치에 접근시키는 상관지수이다.

따라서 예측 수식을 주어진 유역에 적용하기 위해서는 보정 및 검증과정을 거쳐야 한다. 즉, 실측치와 모의 발생치 사이의 차이를 최소화하여 수식에 포함된 매개변수를 결정하는 과정이다. 보정방법은 시행오차에 의한 최적적합법과 수학적 방법 등으로 구분된다. 시행오차법은 매개변수의 초기치를 가정하여 계산하고, 그 결과를 실측치나 이론치 등과 비교한 다음, 임의의 변수를 임의의 양만큼 조정하여 결과를 얻어 오차를 줄여가는 방법이며, 수학적 보정은 변수의 선정과 변화량 등은 수학적 방법으로 행하는 것이다. 본 연구에서는 매개변수 추정을 위하여 시행오차법에 의한 최적적합법을 적용하였다.

그러므로 본 연구에서는 “ α ”와 “ γ ”를 구하기 위하여 내성천, 금호강, 남강 등 낙동강 유역 주요 13개 지천에 대해 2002년 약 12회에 걸쳐 실측된 유달부하량 자료를 이용 유역별, 항목별 평균값을 구하여 이들 평균값에 시행오차법에 의한 최적적합을 통해 “ α ”와 “ γ ”를 구하여 Table 2에 수록하였다.

조사대상 모든 하천, 모든 항목에서 실측치와 모의 발생치의 상관계수 “R”값은 0.65~0.96의 다양한 값을 가졌지만 대부분의 하천과 항목에서 “R=0.8”이상의 높은 상관계수를 보임으로서, 본 연구에서 개발된 일별 유달부하량 예측 수식은 수질과 유

Table 2. Optimal parameter for the estimation of daily pollutant loads by trial and error method

sites	items	BOD			TN			TP		
		α	β (mm)	γ	α	β (mm)	γ	α	β (mm)	γ
Naesung chun		0.849	2.12	0.78	-0.70	2.12	0.83	0.78	2.12	0.76
Young gang		0.900	2.12	0.75	-0.59	2.12	0.81	0.85	2.12	0.74
Byungsungchun		0.896	2.19	0.81	-0.21	2.19	0.82	0.72	2.19	0.72
Weechun		0.923	2.79	0.80	0.28	2.79	0.79	0.93	2.79	0.75
Gamchun		0.953	2.19	0.77	-0.45	2.19	0.84	0.75	2.19	0.77
Keumho gang		0.875	1.83	0.82	0.30	1.83	0.82	0.61	1.83	0.76
Heachun		0.896	2.12	0.81	-0.89	2.12	0.81	0.91	2.12	0.79
Hwang gang		0.862	2.78	0.79	-0.42	2.78	0.83	0.68	2.78	0.76
Namgang		0.865	2.78	0.74	0.23	2.78	0.78	0.80	2.78	0.77
Kwang ryuchun		0.908	1.85	0.76	0.54	1.85	0.79	0.92	1.85	0.78
Hwapo chun		0.855	1.85	0.78	0.72	1.85	0.83	0.93	1.85	0.80
Meelyang gang		0.942	1.85	0.80	0.28	1.85	0.77	0.95	1.85	0.76
Yangsang chun		0.719	3.64	0.82	-0.66	3.64	0.82	0.78	3.64	0.77

량을 측정하지 않고 최소한의 매개변수 산정을 위한 실측자료만이 생산된다면 실측자료를 통해 모델식을 완성하여 이들 결과를 실측치가 없는 대상 기간에 적용함으로써 수질과 유량 동시측정에 소요되는 많은 시간과 비용을 최소화 할 수 있는 가능성 보여 주었다.

이와 같이 2002년의 실측 유달부하량 자료를 이용하여 추정된 각 하천별 최적매개변수 값을 수정 없이 2001년과 2003년에 적용하여 모의 발생된 일별 유달부하량 자료를 실측 유달부하량 자료와 비교함으로써 모형식을 검증하였다.

Fig. 1은 남강에서의 BOD에 대한 모델식의 보정 결과(2002년)를, 그리고 Fig. 2와 3은 2001년과 2003년의 검증결과를 보여준다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 2002년의 자료를 이용하여 최적화시킨 결과가 실측치를 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

또한 2001년과 2003의 실측 결과와 모의발생치의 비교를 통해 모형식을 검증한 결과 검증대상 전 기간에 걸쳐 모의 발생치는 실측치를 비교적 잘 모사하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 일별 유달부

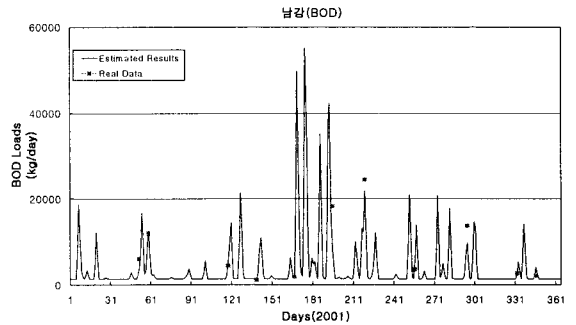


Fig. 2. Verification of the estimated variables (2001, BOD).

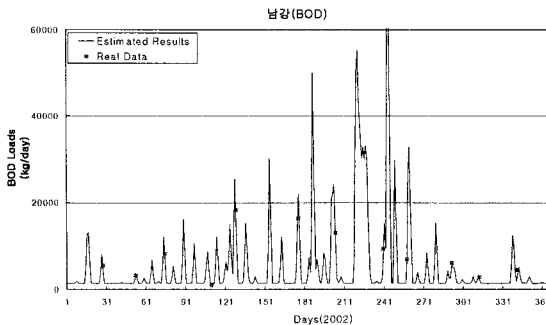


Fig. 1. Best fitted model for the estimation of optimal variables(2002, BOD).

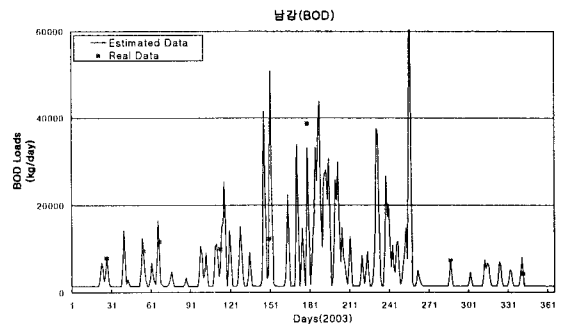


Fig. 3. Verification of the estimated variables (2003, BOD).

하량 추정 모델은 수질 및 유량 측정치는 없지만 대상 유역권에 대한 강우자료만 있다면 언제든지 유달부하량을 일별로 간접적인 방법으로 비교적 정확히 실측값을 예측할 수 있음을 보여주고 있다.

4. 결 론

낙동강수계 본류 및 주요지천들에 대한 발생부하량 자료가 획득 가능한 BOD, TN 및 TP 항목에 대한 수질조사 결과, BOD 항목의 경우 낙동강 하류권의 서부지역에 위치한 남강이 2001년, 3.1 mg/L, 2002년 2.6 mg/L, 2003년 2.1 mg/L로 지속적으로 감소하였다. 반면 상류의 내성천은 BOD 값이 지속적으로 상승하였으며, 상류권의 위천과 중류권의 황강은 연도별 경향은 없었으나 낙동강 유역 지천들 중 수질이 양호한 것으로 조사되었다. TN의 경우 낙동강 중류권역의 금호강의 TN 값이 꾸준히 낮아지는 경향을 보였으며, 금호강을 제외한 하천들의 경우 특별한 연도별 상관성을 보이지는 않았다. 그러나 낙동강 유역 본류 및 주요지천의 TN 값은 연도와 지점에 관계없이 대단히 높은 값을 보였다. TP 항목 역시 TN과 같이 특별한 연도별 상관성은 보이지 않았으나, 2001년 금호강의 경우 0.725 mg/L로 조사대상 모든 지점, 모든 기간 중 가장 높은 농도를 보였으며, 수질이 양호한 황강, 위천 등도 높은 TP 값을 보였다.

낙동강유역 본류 및 주요지천들에 대한 유량조사결과 낙동강 본류 지점들을 제외하고는 남강에서 가장 많은 유량을 보였으며, 다음으로 황강, 밀양강, 금호강, 내성천 등의 유량이 비교적 풍부하였다. 또한 본류의 유량은 하류로 진행됨에 따라 지천에서 유입되는 유량에 의해 증가하였다.

또한 대상 유역별 일 유출량 자료를 이용 수질과 유량을 측정하지 않고서도 일별 유달부하량을 예측할 수 있는 단순화된 일별 유달부하량 추정모델식을 낙동강 주요지천들에 대하여 개발하였다.

낙동강 유역 주요지천들에 대한 각 항목별 일별 유입부하량 추정모델식을 아래와 같이 개발하여 제시하였다.

$$\text{일별 유달부하량} \left(\frac{\text{kg}}{\text{day}} \right) = \text{발생부하량} \left(\frac{\text{kg}}{\text{day}} \right) \times (1 - \alpha) \times \left(\frac{\text{일유출량}}{\text{연평균유출량}} \right)^{\gamma}$$

참 고 문 헌

- 1) 박규석, 1997, 우리나라 하천의 수질현황 및 문제점, 한국수자원학회지, 30(11).
- 2) 윤영삼 등, 2003, 낙동강 유역 소수계별 유달부하량 산정 및 평가모델 개발, 국립환경과학원 연구보고서.
- 3) 건설교통부, 1995, 하천시설 기준(조사편), 한국수자원학회지, P93.
- 4) 오규창 등, 1991, 한강에서 하천유지유량 산정, 한국수문학회지, 24(1).
- 5) 김태철 등, 1986, 장기 유출 해석을 위한 유효강우 추정, 한국농업공학회지, 31(2).
- 6) Gunnerson, C. G., 1967, Stream Flow and Quality in the Columbia River Basin, ASCE, 93(SA6).
- 7) 田淵俊雄, 黒田久雄, 1993, LQ식에 유출부하량산출에 측정정도의영향 농업토목학회논문집(164), p. 1-9.
- 8) 조태웅 등, 2001, 낙동강 수계별 오염부하량 조사 연구(I), 낙동강물환경연구소 연구보고서, NIER No. 2001-35-627.
- 9) 양상용 등, 2002, 낙동강 수계별 오염부하량 조사 연구(II), 낙동강물환경연구소 연구보고서, NIER No. 2002-31-670.