

영일만 유입오염부하량과 수질의 시·공간적 변동특성(I)

- 하천유량과 유입오염부하량의 계절변동 -

윤한삼* · 이인철* · 류청로*

*부경대학교 해양공학과

Spatial and Temporal Variation Characteristics between Water Quality and Pollutant Loads of Yeong-il Bay (I)

- Seasonal Variation of River Discharge and Inflowing Pollutant Loads -

HAN-SAM YOON*, IN-CHEOL LEE* AND CHEONG-RO RYU*

*Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Yeong-il Bay 영일만, Hyeong-san River 형산강, Tank Model 탱크모델, Precipitation 강우량, Evaporation 증발량, Pollutant Loads 오염물질, Seasonal Variation 계절변동, Spatial Distribution Characteristics 공간분포특성

ABSTRACT: This study investigates the seasonal variation and spatial distribution characteristics of pollutant load, as executing the quality valuation of pollutant load inflowing into Yeong-il Bay from on-land including the Hyeong-san River. Annual total pollutant generating rate from Yeong-il Bay region are 202ton-BOD/day, 620ton-SS/day, 42ton-TN/day, and 16ton-TP/day, respectively. Particularly, the generating ratio of the pollutant loads from the Hyeong-san River is greater than that of any other watershed of the Yeong-il Bay, of which BOD is about 78.2%, SS 88.5%, T-N 62.5%, T-P 73.1%. As calculating Tank model with input value of daily precipitation and evaporation of 2001 year in drainage basin of the Hyeong-san River, the estimated result of the annual river discharge effluence from this river is 830106m³. As a result to estimating annual effluence rate outflowing at the rivers from each drainage basin, annual inflow pollutant rates are 10,633ton-BOD/year, 19,302ton-SS/year, 15,369ton-TN/year, 305ton-TP/year, respectively. The population congestion region of the Pohang-city is a greater source of pollutant loads than the Neang-Chun region with wide drainage area. Therefore, the quantity of TN inflowing into Yeong-il Bay is much more than T-P. The accumulation of pollutant load effluenced from on-land will happen at the inner coast region of Yeong-il Bay. Finally, we would make a prediction that the water quality will take a bad turn.

1. 서 론

영일만은 청정해역인 동해 남동부 해역과 인접한 경북 포항시 흥해읍 달만갑과 대보면 호미곶(구 장기갑) 사이의 약 10 km에 달하는 개구부로 이루어진 장방형 내만이다(Fig. 1). 그러나 포항제철을 비롯한 대규모 공업단지에서 배출되는 산업폐수와 인근도시지역에서 배출되는 생활폐수 등이 영일만에 유입됨으로써 만내오염물질의 절대량이 증가하여 영일만내의 수질이 점차 악화되고 있는 실정이다(강양순 등, 2002).

만내 유입오염물질 주유입원은 형산강, 냉천을 포함한 6개의 소하천, 포항제철의 3개 배수구, 포항구항의 도시하천 등이 있으며, 이러한 오염물질의 유입 및 확산으로 인해 오염부하량(COD) 및 영양염류(T-N, T-P)의 증가, 해수 및 저질의 오염정화 능력 저하와 더불어 적조 및 부영양화 등 만내 수질 및 생태계에 미치는 영향이 크게 증가하고 있다(이창희 등, 2001). 특히 형산강은 울주군 두서면 내와리에서 발원하여, 경주시 및 포항시

를 경유, 영일만내로 유입되는 총연장 62.2km, 유역면적 1,166km²인 하천이며, 유하시간은 28.1시간(평균기 기준)으로 유하거리가 짧고 하상경사가 매우 급해 하천으로서의 자정능력이 떨어지는 자연적 조건으로 인해 영일만내 오염물질의 유입량이 큰 것으로 보고된 바 있다(김기태, 1992).

이에 강양순 등(2002)은 영일만 수질관측 결과를 통해 만내 수질악화의 원인을 육상으로부터의 생활하수나 산업폐수에 기인한 오염물질의 과다공급(특히 질산질소)으로 보고하였으며, 만내 수질악화방지대책으로 주요염원인 하천수 유입시 오염물질 유입량 조절의 필요성을 강조하였다.

이상과 같이 영일만을 비롯해 우리 나라 대부분의 연안역이 육상으로부터 오염물질 유입이 증가하는 현상에서 육상유입 오염부하량의 정량적 평가는 연안 수질오염의 영향정도를 파악하고 장래 만내 유입오염물질 관리 및 저감대책수립을 위해 절실히 요구되어지는 연구과제이다(조홍연 등, 1999). 그러나 하천 유출에 따른 오염부하량의 중·장기적인 유량변동을 반영하거나 계절적인 변동성을 정성적·정량적으로 평가하기가 곤란하므로, 강우시의 하천유량 및 오염부하량의 시간변동 특성을 파악할 수 있는 일별 강우-유출모형의 구축을 통해 연안해역의 육

제1저자 윤한삼 연락처: 부산광역시 남구 대연3동 599-1

051-620-6222 yoonhans@mail1.pknu.ac.kr

상유입오염부하량을 평가하기위한 시도가 있어 왔다(이찬원 등, 1998).

그러나 현재 형산강을 하천유량 변동에 따른 영일만내 육상유입오염부하량의 정량적 평가를 수행한 연구는 찾아보기 힘들고, 아울러 유입오염부하량의 계절별 변동특성에 따른 영일만 수질의 시·공간적 변동특성을 규명한 연구결과는 전무한 실정이다. 이에 본 연구는 영일만 육상유입오염부하량의 정량적 평가와 계절별 변동 및 공간적 분포특성을 고찰하고자 한다.

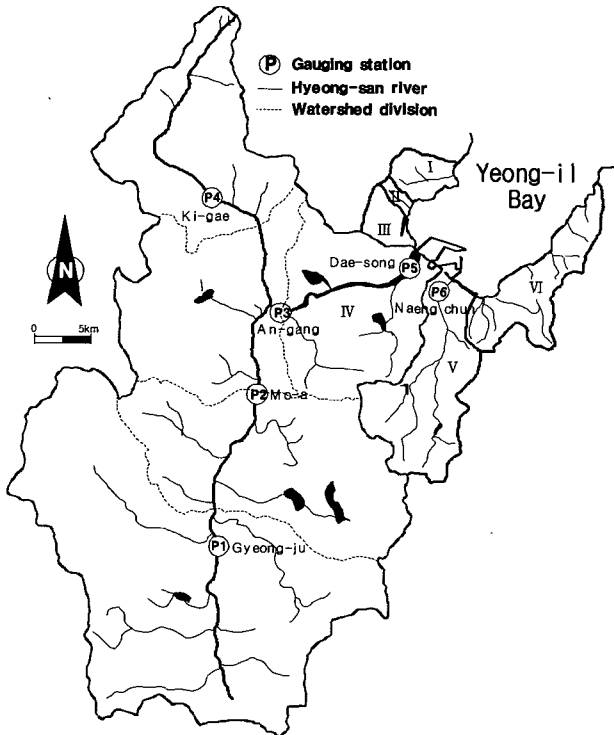


Fig. 1 River basin of Yeong-il Bay and location of the selected stations

2. 재료 및 방법

2.1 유역유출모형 구축

Tank 모델은 이수계획시 필요한 일단위 장기유출량을 추정하는데 최근 많이 사용되는 모형(Yokoo et al., 2001; Hashino et al., 2002)으로, 대부분의 다른 유출 모형이 복잡한 구조와 매개변수 보정시 많은 실측자료를 필요로 하는데 반해, Tank 모델은 일별 유출량을 추정하는데 있어 구조의 단순성과 적은 양의 입력자료가 요구된다는 점에서 좋은 모형으로 평가받고 있다(Sugawara, 1986; Lee et al., 1995).

본 연구는 일별 하천유량을 산정하기 위해 Fig. 2와 같이 4개의 Tank가 직렬로 배치된 cascade모형을 구축하였다. 본 Tank 모델은 하천유량을 근사적으로 1단은 표층유출(단기유출, 2일이내), 2단은 중간유출(약 1주일정도), 3단은 준기저유출(2~3개월정도), 4단은 기저유출(년단위정도)의 반감기를 가진 4개 성분의 합으로 표시하는 것으로, Fig. 2의 우측에 나타내어진 지하수의

단층적 구조를 단순화시킨 모형이다. 이는 강우가 발생하면 각 Tank의 우측 유출공과 바다 침투공을 통해 물이 저류하여 해당 유출공의 높이에 수위가 도달하면 하천으로 유출한다는 개념으로서, 각 Tank의 유출공에서 유출되는 유출량의 합계를 유역의 총유출량으로 산정하는 모형이다. Tank 모델내 첫 번째 Tank의 기본식은 다음과 같다.

$$X_1 = X'_1 + R - E \tag{1}$$

$$Q_0 = A_0 \cdot (X_1 - H_0) \tag{2}$$

$$Q_1 = A_1 \cdot (X_1 - H_1) \tag{3}$$

$$S_1 = B_1 \cdot X_1 \tag{4}$$

여기서, R=강우량(mm/day), E=증발산량(mm/day), Q_0, Q_1 표층 및 1단 유출량(mm/day), A_0, A_1 표층 및 1단 유출계수, H_0, H_1 표층 및 1단의 바닥에서 유출공까지의 높이(mm), X_1 =저류고(mm), X'_1 =전일의 저류고(mm), S_1 =침투량(mm/day), B_1 =침투계수이다. 또한 두 번째 이하 Tank에서의 기본식은 다음과 같다.

$$X_i = X'_i + S_{i-1} - E \tag{5}$$

$$Q_i = A_i \cdot (X_i - H_i) \tag{6}$$

$$S_i = B_i \cdot X_i \tag{7}$$

여기서, Q_i =i단의 유출량(mm/day), A_i =i단의 유출계수, H_i =i단의 바닥에서 유출공까지의 높이(mm), X_i =i단의 저류고(mm), X'_i =전일의 i단 저류고(mm), S_i =i단의 침투량(mm/day), B_i =i단의 침투계수이다. 최종적으로 각 Tank의 유출량을 구하고 다음 식 (8)을 통해 하천유량으로 산정한다.

$$Q(\text{m}^3/\text{sec}) = (Q_0 + \sum_{i=1}^n Q_i) \times \text{유역면적}(\text{km}^2) / 86.4 \tag{8}$$

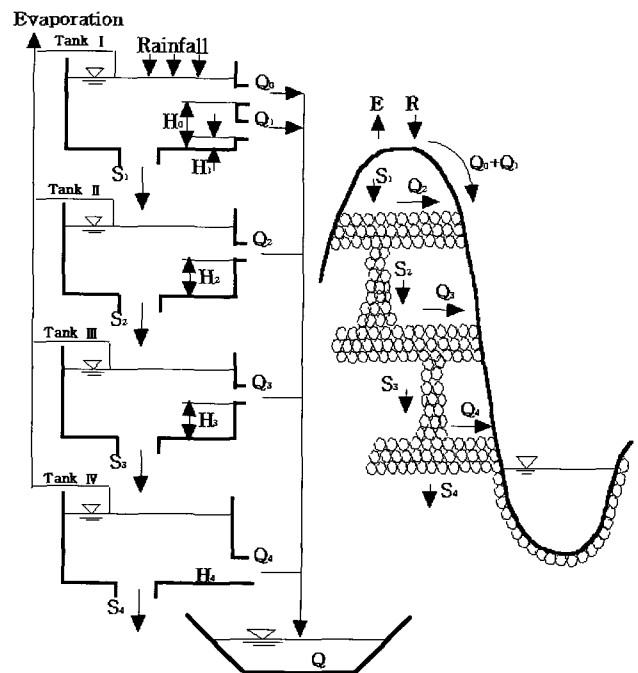


Fig. 2 Schematic diagram tank model

또한 Tank 모델 구축시 요구되어지는 매개변수는 총 18개로 시·공간변동매개변수와 시간변동매개변수로 구분할 수 있는데, 전자는 유출공계수, 유출공 높이 및 침투공계수 등이 있고, 후자로는 탱크의 저류고를 들 수 있다.

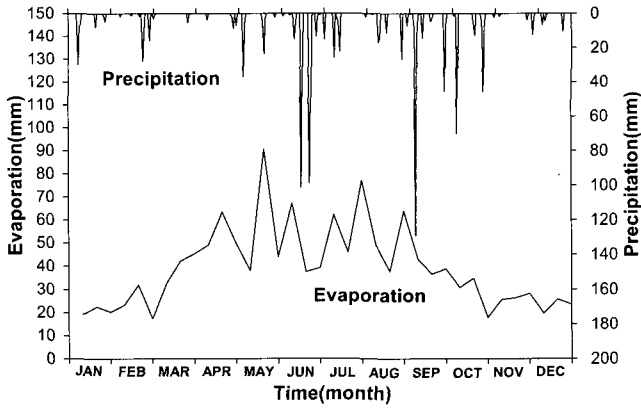


Fig. 3 Monthly precipitation and evaporation(2001)

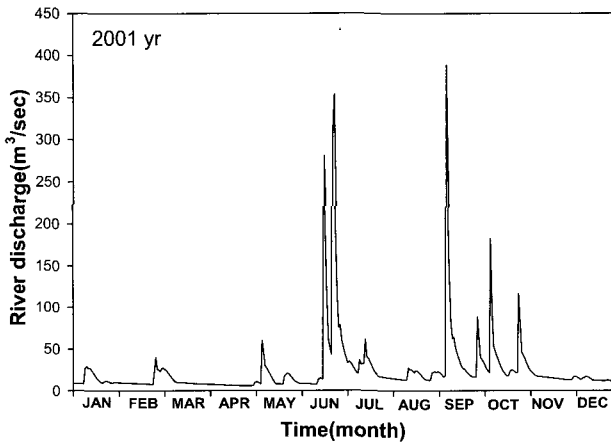


Fig. 4 Annual variation of Hyeong-san river discharge(2001)

2.2 일별 하천유량 산정

영일만내로 오염물질이 유입되는 각 하천의 유역권을 Fig. 1 과 같이 대표적인 6개 구역(I~VI)으로, 형산강 유역(IV)에 대해서는 5개의 소유역으로 구분하여 선정하였다. 특히 오염물질 유입원은 만내와 인접한 대·소하천과 도시 생활폐수 및 포항공단 배수구로 한정하였으며 기존 통계자료 및 참고문헌을 수집하여 유역특성을 분석하였다. 또한 계절변동에 따른 오염부하량산정에 있어 요구되어지는 각 유역권별 하천유량은 포항관측소 2001년 일별강우량, 증발량 등의 기상자료를 바탕으로 Tank 모델을 사용하여 산정하였다.

Tank 모델은 앞서 기술한 장점이 있는 반면 매개변수의 초기값 추정과 매개변수결정 과정에서 대상해역의 실측자료와의 검증이 요구되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 대상유역에 대한 유출량자료의 미비로 적절한 매개변수의 보정이 불가능하므로, 김현영(1987)의 연구결과와 한국수자원공사(1989, 1992)의 자료에서 제시되어진 매개변수와 유역 지상인자와의 상관 관계를 이용하였다. 또한 기존 자료에서 얻지 못하는 매개변수에 대해서는 형산강 수계 5개 수위관측소로부터 관측되어진 자료와의 검증을 통해 매개변수의 초기값을 설정하고, 각 매개변수들은 시행착오법을 사용해 보정하였다.

Table 1 River discharge of each area(year of 2001)

Month	River discharge of each area ($\times 10^6 m^3$)					
	I	II	III	IV	V	VI
JAN	0.45	0.23	0.52	38.20	3.14	1.39
FEB	0.35	0.18	0.40	29.81	2.45	1.09
MAR	0.41	0.20	0.46	34.15	2.81	1.24
APR	0.21	0.11	0.24	17.79	1.46	0.65
MAY	0.53	0.27	0.61	44.70	3.67	1.63
JUN	2.19	1.10	2.51	184.76	15.19	6.73
JUL	1.00	0.50	1.15	84.59	6.95	3.08
AUG	0.56	0.28	0.64	46.84	3.85	1.71
SEP	1.67	0.83	1.91	140.67	11.56	5.13
OCT	1.44	0.72	1.65	121.48	9.99	4.43
NOV	0.60	0.30	0.69	50.54	4.15	1.84
DEC	0.43	0.22	0.49	36.48	2.99	1.33
Total	9.84	4.94	11.27	830.01	68.21	30.25

Table 2 Pollutant sources from six area basins(year of 2001)

Source	Populations	Livestocks						Land Use(km ²)					Industries						
		Sum (%)	Cattle			Pig		Sum (%)	Field	Paddy field	Forest	Lot	Others	Sum (%)	Industrial class				
			Korean cattle	Cow	Rate (%)	Capital	Rate (%)								1	2	3	4	5
I	50,284 (9.1)	61 (0.03)	25	0	0.05	36	0.03	14.79 (1.1)	1.20	2.24	8.80	1.27	1.27	35 (3.0)	-	-	1	-	34
II	44,689 (8.1)	164 (0.09)	114	0	0.26	50	0.04	7.49 (0.6)	0.41	0.50	4.47	0.88	1.23	38 (3.5)	-	-	-	-	38
III	184,304 (33.2)	9 (0.01)	9	0	0.02	0	0	16.17 (1.2)	0.61	0.71	4.02	6.00	4.84	264 (24.3)	-	-	1	1	262
IV	205,109 (37.0)	170,954 (97.63)	39,784	14,544	98.24	116,626	97.33	1,180.06 (86.8)	85.09	200.61	925.50	31.29	51.72	557 (51.3)	3	4	4	8	538
V	54,667 (9.9)	2,932 (1.67)	433	199	1.14	2,300	1.92	97.15 (7.1)	3.07	5.09	57.23	3.37	28.39	167 (15.4)	3	42	11	12	99
VI	15,519 (2.8)	1,004 (0.57)	128	66	0.35	810	0.68	43.61 (3.2)	4.36	4.73	30.92	0.88	2.72	24 (2.2)	-	12	-	-	12
Total	554,572 (100)	175,124 (100)	40,493	14,809	100	119,822	100	1,359.27 (100)	94.8	213.9	1,030.9	43.7	90.2	1,085 (100)	6	58	17	21	983

일별 하천유출량 산정을 위한 모의발생기간은 2001년을 대상으로 하였으며, 포항관측소의 일별 강우량 및 증발량 자료(기상청, 2001)를 이용하여 모의발생실험을 수행하였다(Fig. 3). 각 유역권의 증발량은 기상청 기상연보를 이용하였는데 기상연보자료가 상·중·하수에 해당하는 증발량 자료이므로 계산시 입력 일별 증발량은 약 10일 간격으로 동일하게 적용하였다. 계산되어진 일별 하천유량 계산결과와 검증자료로는 건설교통부 낙동강 홍수통제소(1999, 2000)의 관측소별 유량측정자료를 참고하였다.

2.3 계절별 오염부하량 산정

Fig. 1에서의 유역권별 오염원 현황을 형산강 및 주변 유역이 위치한 포항시, 경주시, 울주군의 통계연보(2001)를 바탕으로 인구 및 토지이용, 가축사육현황 등 유역에 대한 2001년도의 점오염원 및 비점오염원 현황을 조사하고 이를 바탕으로 유역권별 일평균 발생오염부하량을 산정하였다.

Table 3 Pollutant sources

Source	Item	Pollutant sources			
		BOD	SS	T-N	T-P
Population (g/p · day)	Urban	62.0	62.0	7.75	1.63
	Rural	51.0	60.0	7.75	1.63
Livestock (g/h · day)	Korean cattle	640.0	3,800.0	128.0	72.0
	Cow	170.0	4,345.0	162.5	187.0
	Pig	125.0	356.0	20.40	16.80
Land use (kg/km ² · day)	Field	7.1	7.59	2.33	0.17
	Paddy field	5.12	4.41	2.33	0.17
	Forest	87.59	277.73	0.759	0.027
	Lot	0.96	1.26	0.55	0.013
	Others	0.96	1.26	0.759	0.027
Wastewater (g/m ³)	"Clean"area	30	30	23.9	6.8
	"A"area	60	60		

유역권별 오염원 조사항목은 점오염원으로 인구에 대한 생활오염원과 가축사육에 의해 발생하는 축산오염원 및 공장 등 산업시설에서 배출되는 공장폐수를 대상으로 하였으며, 비점오염원으로는 전, 답, 임야, 대지 및 기타지역 등 토지이용에 따라 강우유출에 의해 발생하는 오염원을 대상으로 하였다.

Table 4 Daily total pollutant loads generating from six area basins(year of 2001)

(Unit: kg/day)

Source Area	Total				Populations				Livestocks				Land use				Industrial wastewater			
	BOD	SS	T-N	T-P	BOD	SS	T-N	T-P	BOD	SS	T-N	T-P	BOD	SS	T-N	T-P	BOD	SS	T-N	T-P
I	4,427	6,741	1,246	322	2,564	3,117	389	81	20	108	4	2	793	2,466	16	1	1,050	1,050	837	238
II	3,897	5,610	1,277	340	2,279	2,770	346	72	79	451	16	9	399	1,249	7	1	1,140	1,140	908	258
III	17,696	20,150	7,751	2,097	9,399	11,058	1,428	300	6	34	1	1	371	1,138	13	1	7,920	7,920	6,309	1,795
IV	158,338	549,461	26,161	11,742	10,460	12,306	1,589	334	42,512	255,891	9,835	7,544	82,776	258,674	1,425	75	22,590	22,590	13,312	3,789
V	13,487	27,598	4,635	1,335	2,788	3,280	423	89	598	3,328	135	107	5,091	15,980	86	4	5,010	5,010	3,991	1,135
VI	4,472	11,358	785	226	791	931	120	25	194	1,061	44	35	2,767	8,646	47	3	720	720	574	163
Total	202,317	620,918	41,855	16,062	28,281	33,462	4,295	901	43,409	260,873	10,035	7,698	92,197	288,153	1,594	85	38,430	38,430	25,931	7,378

또한 유역권별 만내 유입지점에서 얻어진 수질자료를 통해 유입오염부하량을 산정하고 이를 통해 오염부하량 유달율을 산정하였다. 여기서 유달율은 실측 오염부하량과 발생부하량과의 비로 정의하였다.

사용되어진 수질자료는 환경부 수질관측망자료로 형산강(5개 지점), 냉천의 총 6개 지점의 월별 평균 COD, T-N, T-P를 비롯한 수질오염물질 5개 항목이다. 일별 수질변동값은 월별 수질자료를 등분할하여 산출하였다. 이를 통해 각 유역별 하천에서 발생하는 오염부하량은 산정된 1일 하천유량에 수질오염물질 농도를 곱하여 일별 오염부하량을 산정하고, 유역권별 만내 유입 오염부하량의 계절변동 및 공간적 분포를 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 일별 하천유량산정

하천유량 산정 Tank 모델을 사용하여 2001년 형산강 수계의 일별 하천유량을 산정하였다. Fig. 3은 입력값으로 주어진 일별 강우량과 증발량의 계절별 분포특성을 나타내며, 일별 하천유량 계산결과는 Fig. 4와 같다. 또한 형산강을 비롯한 나머지 유역권에 대해서도 형산강 유역에 대한 Tank 모델 계산조건을 동일하게 적용·계산하여 각 유역권별 월별 하천유량 산정결과를 Table 1에 제시하였다.

일별 강우량과 증발량의 계절별 분포특성을 살펴보면 2001년의 경우 대상해역인 영일만의 강우량은 연중 6월과 9월, 10월에 높은 수치를 나타내었으며, 증발량의 경우 5월부터 8월 사이에서 크게 나타났다. 또한 산정되어진 하천유량의 계절별 특성을 살펴보면 연중 형산강 유역(IV구역)이 약 830×10⁶m³로 가장 많았으며, 그 다음으로 냉천유역(V구역)이 약 68.2×10⁶m³로 나타났다. 그 외 유역은 대체로 30×10⁶m³미만의 수치를 나타내었다. 계절별로는 강우량이 높은 수치를 나타낸 6월, 9월, 10월에 하천유량도 많은 것으로 산정되었다. 강우 특성에 따른 하천유량산정 결과와 강우-유출모형인 본 Tank 모델의 계산결과는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.2 유역별 발생오염부하량 산정

각 유역권별 발생오염부하량을 산정하기 위하여 점오염원 및

비점오염원 현황을 분석한 결과는 Table 2에 제시하였다. 오염부하량인 BOD, SS, T-N, T-P에 대한 발생량을 산정하기 위한 각 오염원의 발생원단위(이인선 등, 1999; 이재관 등, 2000)는 Table 3과 같다. 특히, 산업폐수 배출의 경우 IV구역에 해당되는 형산강 유역이 업체수 557개(51.3%)로 가장 많고, 업종별로는 대체로 4~5종 업소이다. 산업폐수의 배출허용기준단위를 적용하기 위한 유역구분은 형산강 수역내 안강읍 외 9개 지역을 A 지역으로, 그 외 지역은 청정(Clean)지역으로 구분하였으며, 폐수배출업소에 대한 대상규모는 형산강 수역내 용강공업단지의 7개의 대규모 공단시설을 대상으로 하였으며, 1일 폐수배출량은 $2 \times 10^3 \text{ m}^3$ 으로 동일하게 적용하였다(경주상공회의소 등, 1996).

이와 같이 영일만내로 유입되는 각 하천 유역권에서의 점오염원 및 비점오염원과 같은 육상오염원에 의해 발생하는 일일 총오염발생량 및 연간 총오염발생량의 계산결과는 Table 4, 5와 같다. Table 4에서 일일 총오염물질발생량은 각각 202ton-BOD/day, 620ton-SS/day, 42ton-TN/day, 16ton-TP/day인 것으로 나타났다. 또한 Table 5는 각 유역권별 연간 총오염발생량을 나타낸 것으로 형산강으로부터 발생하는 오염부하량이 가장 많았으며, 영일만 유역 전체 오염물질발생량 중 BOD가 78.2%, SS 88.5%, T-N 62.5%, T-P 73.1%의 비율을 차지하였다. 오염원별로 살펴보면 산업폐수, 축산폐수, 생활폐수의 순으로 오염물질발생량이 많은 것으로 분석되었다.

Table 5 Annual total pollutant loads of year 2001

Source Area	Pollutant loads(ton/year)			
	BOD	SS	T-N	T-P
I	1,615.86 (2.2)	2,460.47 (1.1)	454.79 (2.9)	117.53 (2.0)
II	1,422.41 (1.9)	2,047.65 (0.9)	466.11 (3.1)	124.1 (2.1)
III	6,459.04 (8.8)	7,354.75 (3.2)	2,829.12 (18.5)	765.41 (13.1)
IV	57,793.37 (78.2)	200,553.3 (88.5)	9,548.77 (62.5)	4,285.83 (73.1)
V	4,922.76 (6.7)	10,073.27 (4.5)	1,691.78 (11.1)	487.28 (8.3)
VI	1,632.28 (2.2)	4,145.67 (1.8)	286.53 (1.9)	82.49 (1.4)
Total	73,845.72 (100)	226,635.11 (100)	15,277.1 (100)	5,862.64 (100)

3.3 유역별 하천수질 특성

환경부(2001) 수질관측망 월별수질자료 분석을 통해 Fig. 1의 형산강 소유역 5개 지점과 냉천의 월별 수질농도의 경년변동을 나타낸 것이 Fig. 5~Fig. 8이다. COD의 월별변동을 나타낸 Fig. 5에서 형산강 상류로부터 하류로 유하하는 과정에서 수질농도 증가 추세를 보이다가 포항제철과 인접한 정점 5에서 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 형산강의 상류지점인 경주와 기계천의 COD유입부하량은 냉천보다 낮지만 안강지점의 경우는

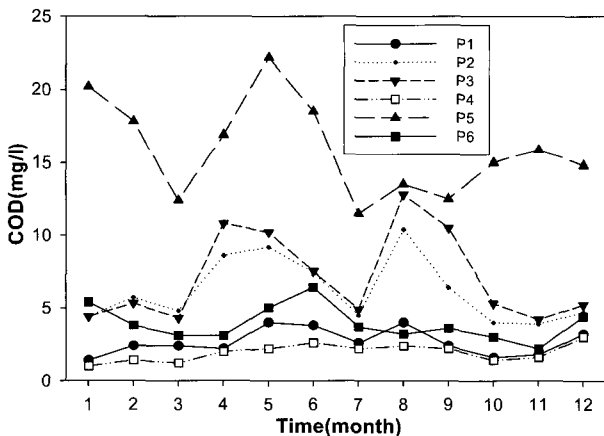


Fig. 5 The monthly variation of COD loads

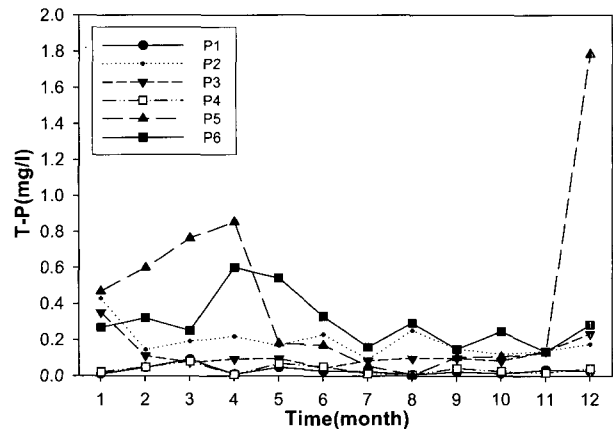


Fig. 7 The monthly variation of T-P loads

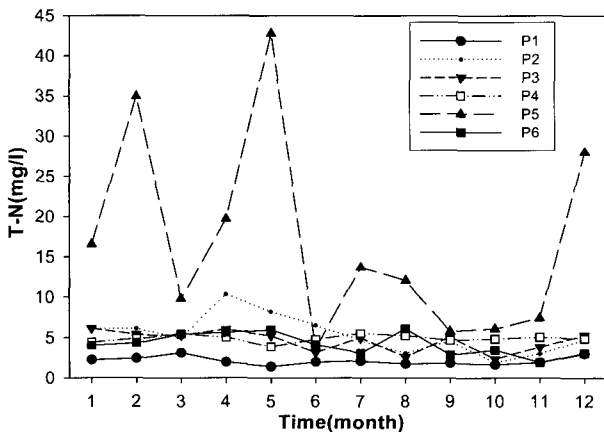


Fig. 6 The monthly variation of T-N loads

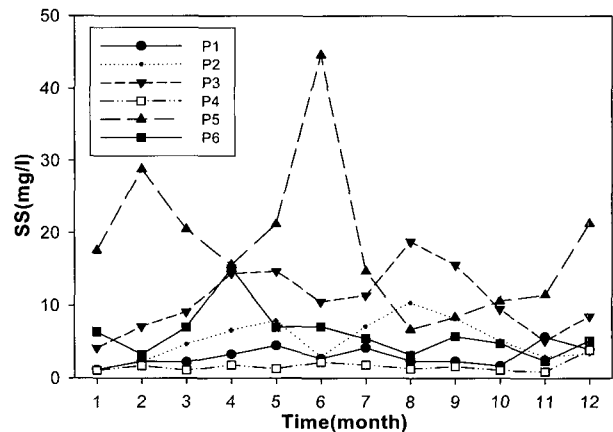


Fig. 8 The monthly variation of SS loads

높게 나타났는데, 이는 경주지역의 도시생활하수와 공단폐수에 기인한 것으로 판단된다.

영양염류인 T-N, T-P의 월별변동은 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었는데 COD에서와 마찬가지로 형산강 상류로부터 하류로 유하하는 과정에서 수질농도가 증가하는 경향을 보였다. 형산강에서의 T-P의 경우 강우량이 많은 하계와 추계에 급격히 떨어져 인근 냉천보다도 작게 나타났다. 또한 부유물질 SS의 경우 형산강이 대체로 동계에 높게 나타났다. 이상의 결과에서 수질농도가 갈수기(12월~2월)에 높고 홍수기(8월~10월)에 낮은 것은 하천 유량 증가로 인한 오염물질 농도의 희석작용에 기인한 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 9에서 형산강 하천수질자료에 대한 정점별 T-N/T-P비를 나타내었는데, 질소(T-N)가 제한영양염이 될 가능성이 높은 질소/인 비 10이하의 경우는 0%에 불과하고, 10~20은 10%, 20~40은 23.3%, 40이상은 66.7%로 대부분의 하천이 인(T-P)제한으로 나타났다. 이는 인(T-P)의 오염부하량이 작기 때문도 하지만, 역설적으로 질소(T-N)의 오염부하량이 지나치게 많기 때문이라고 해석할 수 있다. 그러므로 인(T-P) 제한상태에 있다하더라도 인(T-P) 뿐만 아니라 지나치게 높은 질소(T-N)의 오염부하량 삭감대책 마련이 시급할 것으로 판단된다.

김기태(1992)에 따르면 형산강의 하천수질은 중·하류에 이르면서 생활폐수와 농업폐수(축산폐수)로 인해 악화되면서 하구에 위치한 포항제철 인근을 지나 영일만으로 유입될 때에는 농업, 도시, 산업폐수의 복합체가 된다고 주장하였으며, 강양순 등(2002)은 영일만의 수질환경의 변동은 질산질소의 유입의 영향을 많이 받는다고 집중관리 대상 영양염류가 질산질소임을 보고한 바 있다.

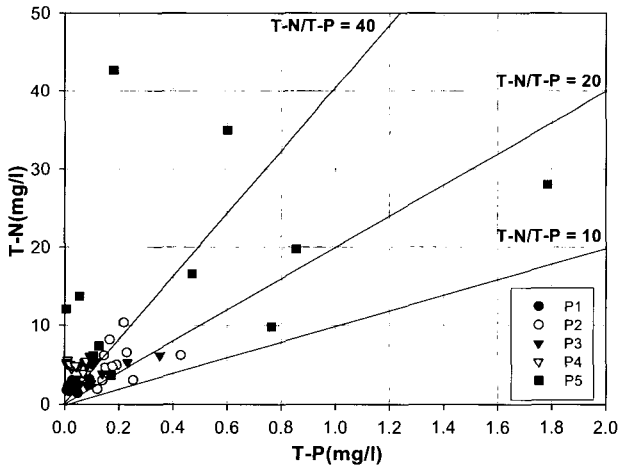


Fig. 9 Criteria diagram of eutrophication(T-N/T-P ratio)

3.4 유달부하량 산정

Table 6은 영일만내 수질에 가장 크게 영향을 미칠 것으로 판단되는 형산강의 월별 각 수질오염물질의 유출부하량을 수질실측치로부터 추정하였으며 이를 통해 유출부하량과 발생부하량과의 비인 유달율을 산정하였다. 일반적으로 유하거리가 짧으면 적은 양의 오염물질이라도 극히 일부만 제거되고 대부분은 만내로 유입된다고 볼 때, IV유역권(형산강 유역권)을 제외한 대상

유역권에 대해서 유하거리가 상대적으로 긴 형산강의 유출율을 동일하게 적용함에는 다소 유출부하량이 과소평가될 소지가 있다.

Table 6 Monthly total effluence rate at Hyeong-San river

Division Year	Total effluence rate(ton/year)				
	BOD	COD	SS	T-N	T-P
JAN	783.1	771.6	672.3	632.8	18.0
FEB	357.7	530.6	858.5	1,042.4	17.9
MAR	263.0	423.5	700.1	334.4	26.1
APR	275.8	300.7	277.5	350.8	15.2
MAY	871.7	992.3	947.6	1,912.3	8.1
JUN	2,254.1	3,418.1	8,240.3	668.7	31.4
JUL	972.8	972.8	1,243.5	1,158.48	4.6
AUG	299.8	632.3	313.8	565.5	0.2
SEP	759.6	1,758.4	1,181.6	817.0	14.5
OCT	680.3	1,822.2	1,287.7	741.2	12.9
NOV	465.0	803.6	581.2	373.6	6.4
DEC	339.3	539.9	777.0	1,021.3	65.1
Total	8,322.2	12,966	17,081.1	124,308	220.4
Effluence ratio(%)	14.40	-	8.52	100.41	5.14

※ Effluence ratio=Effluence rate/Pollutant generation×100

그러나 영일만내로 유입되는 각 하천에 대한 수질실측자료가 부족한 상태에서 대상 유역별 유달율을 산출함에 있어서는 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 형산강의 유달율을 대표값으로 선택하여 그 외 다른 유역에도 동일하게 적용하였다. 경주 및 포항 등의 도시와 농촌이 함께 밀집되어 있는 IV유역권에 대한 유달율의 경우 BOD 14.4%, SS 8.52%, T-N 100.41%, T-P 5.14%로 나타났다.

T-N의 유달율이 다른 항목에 비하여 매우 높게 나타났는데 이는 하천에서 질소화합물의 자정능력이 떨어짐을 의미한다. 또한 Table 7은 대상 각 유역별 하천으로부터의 연간 총오염유출량을 산정한 것으로 연간 총유출은 10,633ton-BOD/year, 19,302ton-SS/year, 15,369ton-TN/year, 305ton-TP/year이었다.

Table 7 Annual total effluence rate(year of 2001)

Source Area	Yearly total effluence rate(ton/year)			
	BOD	SS	T-N	T-P
I	232.7	209.6	456.7	6.4
II	204.8	174.5	468.0	6.7
III	930.1	626.6	2,840.7	41.3
IV	8,322.0	17,081.3	9,618.2	220.3
V	708.9	858.2	1,698.7	26.3
VI	235.1	352.2	287.7	4.5
Total	10,633.6	19,302.4	15,370.0	305.5

3.5 유입 오염부하량 계절변동

Fig. 1의 6개 각 유역권별로 산출되어진 영일만 유입오염부하

량의 BOD, SS, T-N, T-P 수질항목별 영일만내 유입량의 계절별 및 공간분포를 Table 6과 Table 7로부터 추정하였다. 오염물질 부하량은 계절별 강우사상에 따라서 영향을 받는데 이는 점오염원 유출부하량에 비점오염원으로부터의 유출부하량이 부가되어 유량변화에 정비례하게 유출되는 것으로 판단하였다. 따라서 Table 6의 일별 총오염유출량에 대한 계절별 및 공간분포를 Fig. 10~Fig. 13에 나타내었다.

6개 각 유역권에 대한 오염부하량의 계절별 분포특성을 살펴보면 태풍이나 폭우 등 이상기온현상이 심한 하계와 추계에 오염유입량이 많으며 그중 형산강이 가장 많은 것으로 나타낸다. IV권역인 형산강 유역의 경우 하계 BOD가 약 3,170ton, SS 6,507ton, T-N 3,664ton, T-P 84ton이며, 동계도 이와 비슷한 경향을 나타낸다. 특히 인구밀집 지역인 포항구항의 III구역의 BOD와 T-N, T-P의 경우는 상대적으로 유역면적이 넓은 냉천지역의 V구역보다 높게 나타났으며 SS의 경우는 적게 나타났음을 알 수 있다. T-N과 T-P의 경우 모든 대상 유역권에서 4계절 모두 T-P에 비해 T-N이 월등히 높은 수치를 나타내었는데 이는 앞서 상술한 바와 같이 하천수 유입에 따른 질산질소의 과다 유입에 기인한 것으로 생각된다.

또한 오염부하량의 공간적인 분포를 살펴보면 대체로 IV권역인 형산강을 사이에 두고 III권역과 V권역에서 오염물질이 집중적으로 유입되는 것을 알 수 있는데, 이로 인해 영일만내 수질의 악화가 더욱 심화될 것으로 사료된다. 따라서 오염해역은 크게 포항신항을 사이에 두고 형산강하구에서 포항구항 전면 해역, 냉천 하구부에서 약전동 해수욕장 전면 해역까지의 두 해역으로 구분할 수 있으며, 이 구역들이 대체로 영일만내 오염우심지역으로 예측된다. 따라서 이 구역에서의 유입오염물질은 만내의 해수유동구조나 물질수송특성(혼합, 회석 및 확산) 등의 만내 해양환경특성에 영향을 받고, 만내 수질에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

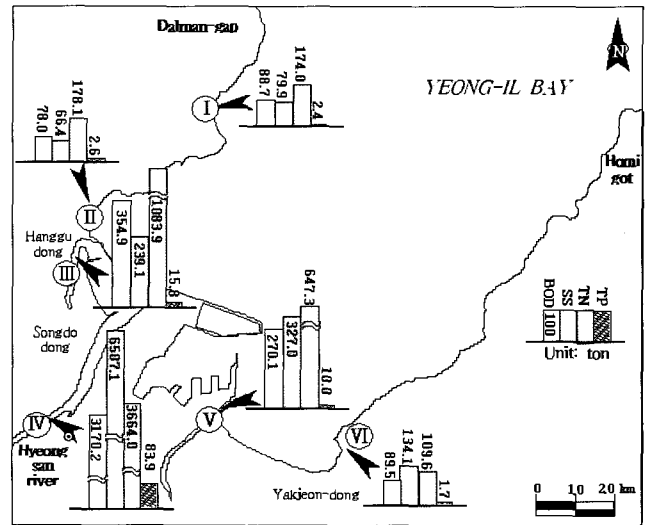


Fig. 11 Distribution of inflow pollutant loads(2001, Summer)

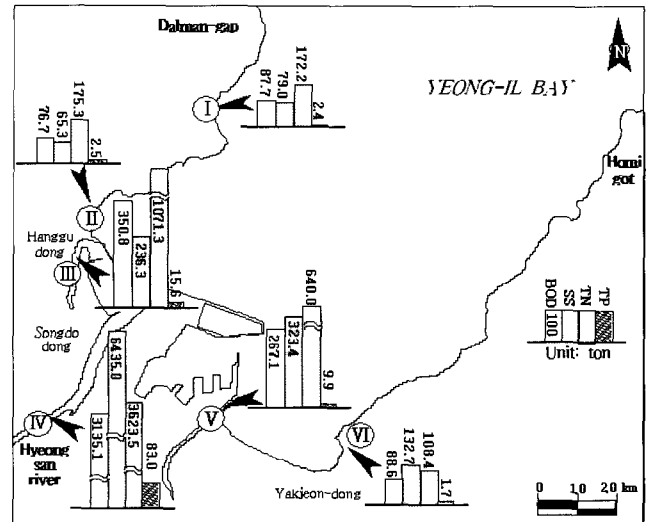


Fig. 12 Distribution of inflow pollutant loads(2001, Autumn)

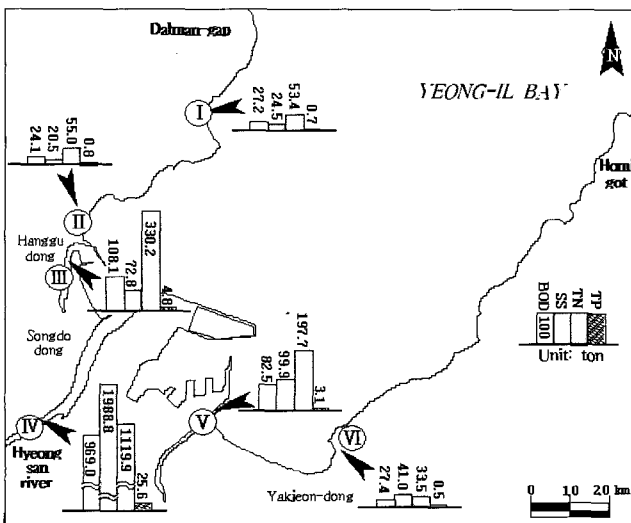


Fig. 10 Distribution of inflow pollutant loads(2001, Spring)

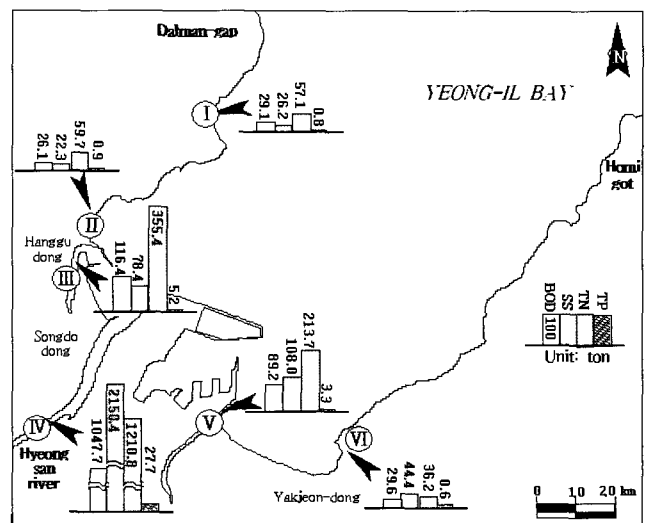


Fig. 13 Distribution of inflow pollutant loads(2001, Winter)

4. 결 론

본 연구는 형산강을 비롯하여 영일만내로 유입되는 육상오염 부하량의 정량적 평가를 수행함과 아울러 강우특성과 밀접한 관계가 있을 것으로 판단되는 오염부하량의 계절별 변동 및 공간적 분포특성을 고찰하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과와 같이 요약할 수 있다.

(1) 형산강 유역 및 주변 유역이 위치한 포항시, 경주시, 울주군의 통계연보(2001)를 바탕으로 인구 및 토지이용, 가축사육현황 등 유역에 대한 2001년도의 점오염원 및 비점오염원 현황을 조사하고 이를 바탕으로 유역별 총오염발생량을 산정하였다. 일별 오염발생량의 총량은 각각 202ton-BOD/day, 620ton-SS/day, 42ton-TN/day, 16ton-TP/day인 것으로 나타났다. 특히 영일만 인근 오염발생량 중 형산강으로부터 발생하는 오염부하량이 가장 많으며, 전체 오염발생부하량 중 BOD 78.2%, SS 88.5%, T-N 62.5%, T-P 73.1%의 비율을 차지하였다.

(2) 2001년 형산강 수계의 일별 강우량과 증발량을 입력값으로 Tank 모델을 계산하여 영일만내로 유입되는 연간 총하천유량을 산정한 결과 약 $954 \times 10^6 m^3$ 이었으며, 이중 형산강이 $830 \times 10^6 m^3$ 로 86.9%를 차지하였다.

(3) 형산강 하천수질자료 정점별 T-N/T-P비에 따라 제한영양염류를 살펴본 결과, 질소가 제한영양염이 될 가능성이 높은 총질소/총인=10이하의 경우는 약 0%에 불과하고, 10~20의 경우는 약 10%, 20~40의 경우는 23.3%, 40이상의 경우는 66.7%로 대부분의 하천이 인 제한으로 나타났다.

(4) 영일만과 인접한 각 유역별 연간 총오염부하량을 추정한 결과, 10,633ton-BOD/year, 19,302ton-SS/year, 15,369ton-TN/year, 305ton-TP/year이었다.

(5) 유입오염부하량의 계절별 특성을 살펴보면, 하계와 추계에 대체로 많으며, 형산강 하계의 경우 BOD 약 3,170ton, SS 6,507ton, T-N 3,664ton, T-P 84ton이었다. 또한 인구밀집 지역인 포항구항이 유역면적이 넓은 냉천지역보다 오염물질의 유출이 많았으며, T-N과 T-P의 경우 4계절 모두 T-P에 비해 T-N이 월등히 높은 수치를 나타내었다.

참 고 문 헌

강양순, 김귀영, 심정민, 성기탁, 박진일, 공재열 (2002). "영일만 수질의 시공간적 변동", 한국수산학회, 제35권, 제4호, pp 431-437.

기상청 (1995~2001). 기상연보.

김기태 (1992). 동해 남부 해역의 연구, 영남대 출판부, pp 17-33.

김현영 (1987). 관개용 저수지의 일별 유입량과 유출량의 모의발생, 박사학위논문, 서울대학교.

건설교통부 낙동강 홍수통제소 (1999). 형산강 수계 유량측정조사 보고서.

건설교통부 낙동강 홍수통제소 (2000). 형산강·태화강 수계 유량측정조사 보고서.

경주시, 포항시, 울산시, 울주군 (2001). 통계연보.

경주상공회의소, 경주지역경제연구센터 (1996). 형산강 경주권 수계의 수질 환경조사와 자연형 하천 보전 방안 연구, pp 11-36.

이인선, 김창수, 류덕희, 신동석, 김소년, 박선영, 홍기협, 이충렬, 조민제, 최선락, 조기돈, 류재근 (1999). "하천수질의 계절별 변동특성에 관한 연구(I)", 국립환경연구원보, 제21권, pp 231-240.

이재관, 신동석, 김창수, 이인선, 이덕길, 조민제, 최희락, 조기돈, 김태규, 허영희 (2000). "하천수질의 계절별 변동특성에 관한 연구(II)", 국립환경연구원보, 제22권, pp 251-264.

이찬원·권영택·양기섭·장풍국·한성대 (1998). "폐쇄성 해역의 오염부하특성과 해역환경변화", 한국해양환경공학회지, 제1권 제2호, pp 60-69.

이창희, 강대석, 남정호, 이병국, 유혜진 (2001). 하구·석호 육해 전이수역 통합환경관리방안 연구, 한국해양수산개발원, pp 30-65.

조홍연, 채장원 (1999). "진해·마산만의 환경관리를 위한 수질 모델링", 한국해양·해양공학회지, 제11권 제1호, pp 41-49.

한국수자원공사 (1989). 낙동강수계 다목적댐 연계운영방안연구 (1차) 보고서.

한국수자원공사 (1992). 전국하천조사서.

환경부 (2001). <http://www.me.go.kr>.

Sugawara, M. (1986). "탱크모델(1) -하천유량을 우량에서 산출하는 한 모델에 대하여", 대한토목학회, 제34권, 제4호, pp 57-60.

Sugawara, M. (1986). "탱크모델(2·완) -하천유량을 우량에서 산출하는 한 모델에 대하여", 대한토목학회, 제34권, 제6호, pp 73-79.

Hashino, M., Yao H., and Yoshida H., (2002). "Studies and evaluations on interception processes during rainfall based on a tank model", J. of Hydrology, Vol 255, pp 1-11.

Lee, I.-C., Ukita, M., Fujita K., and Sekine M., (1995). "A study on the budget of net flux and the characteristics of water quality response in Seto inland sea", Proc. of Environmental Eng. Research, Vol 32, pp 293-300 (in Japanese).

Yokoo, Y., Kazama, S., Sawamoto, M., and Nishimura H., (2001). "Regionalization of lumped water balance model parameters based on multiple regression", J. of Hydrology, Vol 246, pp 209-222.

2003년 6월 23일 원고 접수

2003년 8월 5일 최종 수정본 채택