

농경유역으로부터의 오염부하 장기유출 해석

하성룡, 이광호

1. 서 론

지역의 수환경 보전적 측면으로부터, 지역개발 관리책임자의 기본임무는 지역의 개발이 그 배출 공공수역(하천, 호소 및 해안)환경에 미치는 영향의 정도가 최소화될 수 있도록 개발을 계획 관리하는데 있다 하겠다. 호소 수질관리상의 실질적인 면에서, 이러한 임무수행에는 두가지의 큰 기술적 장애요인이 내포되어 있다. 그 하나는 지역환경에 관한 정보 수집상의 문제이다. 해당지역에서의 개발을 포함한 사회·경제적 활동(Socio-economic activities)은 오염부하를 발생시키고, 발생한 오염부하는 호소유입 지천을 통하여 호소에 유입되게 된다. 따라서 지역오염상태에 관한 정보는 부하 배출원의 지형학적 유출특성이 고려된 유역 단위로 이루어져야 한다. 그러나 현행의 정보수집 및 관리체계상 오염 발생원에 관한 정보는 행정구역단위(군·면단위)로 이루어지며, 수역의 환경영향에 관한 계획 작성 및 평가에도 이들 행정구역 단위의 정보가 유역단위의로의 전환없이 그대로 사용됨으로써, 지천유입 부하량의 정량적 평가가 어렵다. 또한가지 문제는, 유역 오염부하발생, 배출, 및 유출과정에 관한 정보가 일부의 확립된 모형인자에 집중됨으로써 지역특성에 따른 다양한 유출과정에 관한 정보가 해석 모형상에 고려되지 못한다는 점이다.

이러한 결과는, 대상지역의 부하배출과정에 대한 제어능력의 정량적 평가 및 대책안 수립의 구체적인 정보수집을 불가능하게 한다. 즉, 유출부하량은 유역의 사회경제적 활용규모, 발생부하의 배출제어에 관한 기술적 노력, 및 유역 자신이 가지는 자정기능상의 여러 변수에 의하여 큰 영향을 받은 후에 공공수역으로 유입되게 된다.

현재까지 유역으로부터의 오염부하 장기 유출해석에 관한 거의 모든 실용적 계획 및 연구는 이상의 두가지 기술적인 문제에 관한 근본적인 개선의 노력없이 이루어져 온것이 실태이다. 특히 농경지역으로부터의 오염부하 유출은 유역내 경춘북대학교 공과대학 도시공학과

작물의 종류와 량에 따라 지역적인 차가 크고, 시기적으로도 커다란 변화를 보이는 것이 일반적인 관측결과이다.

따라서, 본 연구는 유역특성을 고려한 보다 실질적이고 포괄적인 장기유출 해석 모형을 개발하기 위하여 이루어졌다. 본 모형(BLongRM)에서는 행정구역별로 얻어진 환경정보를 유역정보로 변환하고, 유역의 사회경제적인 요인, 기술적 요인, 및 자연적인 배출특성들을 포괄적으로 고려하고 있으므로, 호소수질 보전적 측면에서의 유역관리 정책수립에 관한 구체적인 평가 수법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 농경유역으로부터의 부하장기유출해석 모형(BLongRM model)

2.1 부하유출의 개념모형 작성

그림 1은 개발된 BLongRM 모형의 system 흐름도를 나타낸 것으로 모형의 기본요소로는 행정구역 단위의 배출부하량 산출단계, 유역단위의 배출부하량 산출단계, 및 선형기여율 모형에 의한 유출부하량 산출단계로 이루어져 있다.

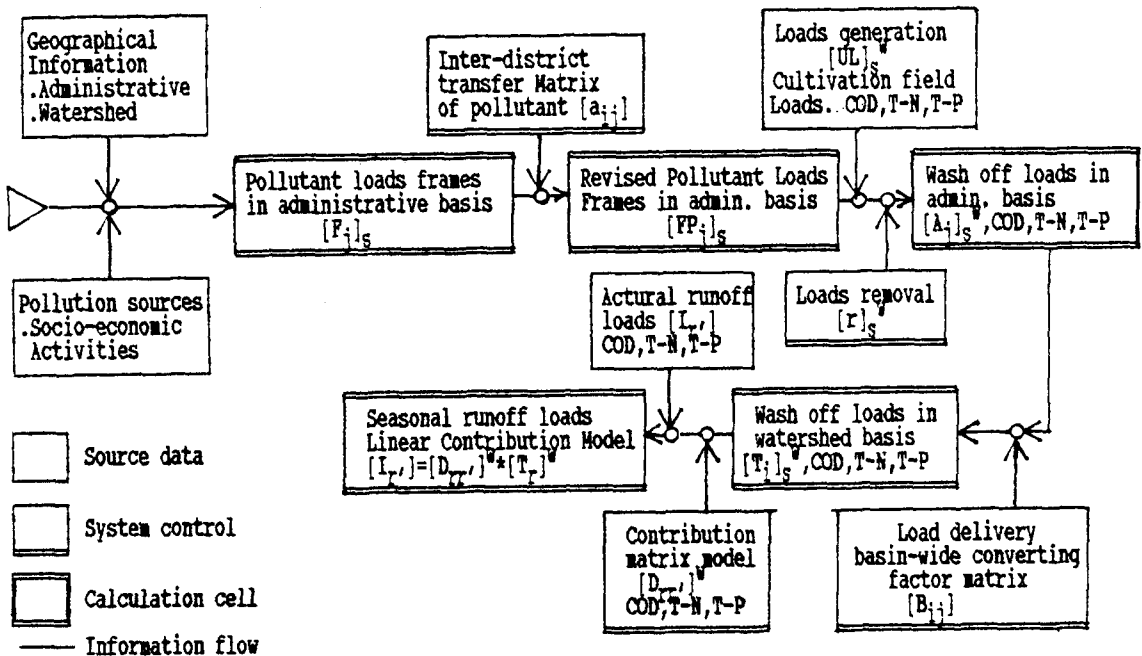


그림 1. BLongRM 모형의 system 흐름도

2.2 행정구역단위 배출부하량 산정

지역의 오염부하발생원인은 사회경제 활동규모이며, 이에 관한 정보는 행정 구역별 오염부하의 frame규모(pollutant load frame data:PLFD)로써 수집되며 그 결과는 다음식으로 정리될 수 있다.

$$[F] = \begin{pmatrix} F_1 & F_1 & \dots & F_1 \\ F_2 & F_2 & \dots & F_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F_j \text{ s=1} & F_j \text{ s=2} & \dots & F_j \text{ s=k} \end{pmatrix} \quad (1)$$

즉, 농경 지역으로부터 오염부하의 발생은 크게, 주민의 생활오염 부하계(농공산업 부하포함), 가축사육 부하계, 농경지 발생 부하계, 및 토지이용에 따른 부하계로 이루어진다. 각 행정구역별, 오염발생 frame별의 발생부하량의 산정은 식(1)의 frame에 각 frame별의 발생부하 원단위(unit production factor)를 곱함으로써 산출되던 것이 이제까지의 기준적인 평가방법이었다. 그러나, 실제 각 지역의 부하 처리체계는 그 지역의 처리시설 보유현황에 따라 큰 차이를 보이며, 처리체계의 차이는 각기 다른 처리효율을 지니, 결과적으로 배출부하량의 지역적 차이를 유발시킨다. 분뇨의 경우, 처리체계는 도시분뇨 처리시설, 가정 정화조시설, 오수정화시설, 농촌등의 간이처리, 무처리방류의 5가지로 대별되며, 이들을 처리인구비로 환산한 결과가 식(2)이다. 즉 행렬식 (2)의 각행의 각 요소는 지역내 처리체계별 인구를 해당 행정구역의 총 분뇨처리 인구로 나눈 결과이다.

$$[FP]_{s=1} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} PL_1 & PS_1 & PC_1 & PM_1 & PN_1 \\ PL_2 & PS_2 & PC_2 & PM_2 & PN_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ PL_j & PS_j & PC_j & PM_j & PN_j \end{pmatrix} t & \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ F_j \end{pmatrix} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ F_j \end{pmatrix} \Bigg|_{s=1} \quad (2)$$

행정구역별의 배출부하량은 그 지역의 부하 frame별 처리체계와 부하발생 frame규모와의 곱에 수질항목별의 원단위와 처리효율을 고려한 다음 식(3)으로 표현된다.

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_j \end{pmatrix}_{s=1}^W = \begin{pmatrix} (UL)_{s=1}^W \times [FP]_{s=1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1-R_1 \\ 1-R_2 \\ 1-R_c \\ 1-R_m \\ 1-R_n \end{pmatrix}_{s=1}^W \quad (3)$$

式(3)에서 R_1, R_s, R_c, R_m, R_n 은 각기 도시 분뇨처리장의 처리효율, 단독식 정화조의 처리효율, 오수정화조의 처리효율, 간이처리효율, 무처리방식에 따른 처리효율을 나타낸다. W 는 수질항목으로 COD, T-S, T-P를 나타내고, $(UL)_s^w$ 는 frame S에 관한 수질항목 W 의 원단위를 나타낸다.

2.3 지역간의 부하량 이송해석

농가의 가축배설물은 가축부하로써 배출되는 경우보다는 퇴비로 전환되어 농경지(전·답)부하의 형태로 상당부분이 배출된다. 양계에 의한 계분등은 거의 전량이 퇴비로 전환되고, 특히 양계업소로 부터 발생하는 대량의 계분은 발생지역 뿐만이 아닌 타 지역으로 이송되어져서 퇴비로의 부속에 필요한 시간이 지체된 후에 이송되어진 지역의 전답에 산포되어지는 것이 일반적이다. 따라서 가축부하에 의한 배출 오염부하량은 퇴비로 전환되는 양에 비례하여 감소되어지며 타 지역으로의 이송 역시 부하발생지역의 배출부하량 감소에 크게 기여하게 된다. 즉, 농가의 가축부하량과 농경지부하량과는 밀접한 상호관계를 지닐뿐 아니라 시기적(비료 및 퇴비 산포시기) 및 공간적으로서의 분포특성에 관한 해석이 요구되어 진다. 본 연구에서는 Input/Output 모형을 도입하여 부하량의 이송상태량을 해석하였으며, 가축부하의 경지부하로의 전환은 퇴비부하량으로 고려하여 퇴비 투여장소와 시기변동을 모형화 하였다.

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_j \\ \vdots \\ A_J \end{pmatrix} \begin{matrix} * \\ W \\ \\ S \end{matrix} = \begin{pmatrix} -\sum_{j=1(j \neq 1)}^J a_{1j} & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & -\sum_{j=1(j \neq 2)}^J a_{2j} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & 0 & -\sum_{j=1(j \neq J)}^J a_{Jj} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1J} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{J1} & a_{J2} & \cdots & a_{JJ} \end{pmatrix} \begin{matrix} t \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_j \\ \vdots \\ A_J \end{pmatrix} \begin{matrix} W \\ \\ \\ S \end{matrix} \quad (4)$$

2.4 유역 배출부하량 산정

배출부하량은 Bayes의 정확률 개념을 도입함으로써 다음 式(5)와 같이 얻어진다.

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_1 \end{pmatrix} \begin{matrix} W \\ \\ \\ S \end{matrix} = \sum_{S=1}^k \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1j} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_j \\ \vdots \\ A_J \end{pmatrix} \begin{matrix} * \\ W \\ \\ S \end{matrix} \quad (5)$$

식의 행렬요소는 각각 유역 i 에 포함된 j 행정구역의 면적을 j 행정구역 전면적으로 나눈 값을 나타내며, j 행정구역 frame 량에 대한 i 유역내의 분율을 의미한다.

2.5 선형 기여율 모형

하천의 수질 관측점 수질부하량과 유역별 배출부하량과의 관계는 선형기여율 개념을 도입하여 정식화 하였다.

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_r \\ \vdots \\ I_1 \end{pmatrix}_W = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & \dots & D_{1r} \\ D_{21} & D_{22} & \dots & D_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{r1} & D_{r2} & \dots & D_{rr} \end{pmatrix}_W^t \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_r \\ \vdots \\ T_1 \end{pmatrix}_W \quad D_{rr'} = \prod_{i=r}^{r'} d_i \quad (6)$$

즉, 하천유출부하량(I)는 유역 배출부하량(T)에 기여율 계수행렬($D_{rr'}$)을 곱함으로써 구해진다. 여기서 기여율 계수행렬의 각 요소 $D_{rr'}$ 은 r 유역의 배출 부하량이 r' 수질관측점의 유출부하에 미치는 기여의 정도를 나타내며, 다음 식으로 정의된다.

$$d_i = \frac{I_{r'}}{\sum_{i=1}^{r'-2} D_{i r'-1} \cdot T_i + C_{r'-1} \cdot T_{r'-1} + T_{r'}} \quad r' \geq 3 \text{ integer} \quad (7)$$

$$d_1 = I_1 / T_1, \quad d_2 = I_2 / (d_1 T_1 + T_2).$$

3. 결과 및 토의

개발모형(BLongRM)을 실 유역의 부하유출현상 해석에 적용하기 위한 검토가 대청호의 청주취수탑 부근 지역을 중심으로 이루어졌다. 수질, 지역의 경제·사회 활동 규모, 및 농경지 시비 및 퇴비 특성에 관한 현장조사와 분석이 2년간에 걸쳐서 이루어 졌다. 조사지역의 유역분할과 수질 조사지점의 위치는 그림 2와 같다.

수질조사는 강우 유출시와 정상 유출시에 이루어 졌으나, 본 연구는 오염부하의 장기유출현상 해석이 주된 목적이므로, 월 2~3회씩 이루어진 수리 및 수질의 정상관측결과에 의거 실시하였다. 지역의 사회·경제활동 실태에 관한 조사는 1987년~1992년에 대하여 문의면 사무소에 양케이트 조사로 실시되었다. 조사된 결과는 spread sheet 형태로 database화 하였고, 실제 모형검증에 사용하였다.

월별 사용 시비량에 관한 정보는 문의면의 월별 비료판매 실적자료와 농촌 지도소의 작목별 표준시비량 자료를 중심으로 전담으로 구분하여 산출하였다.

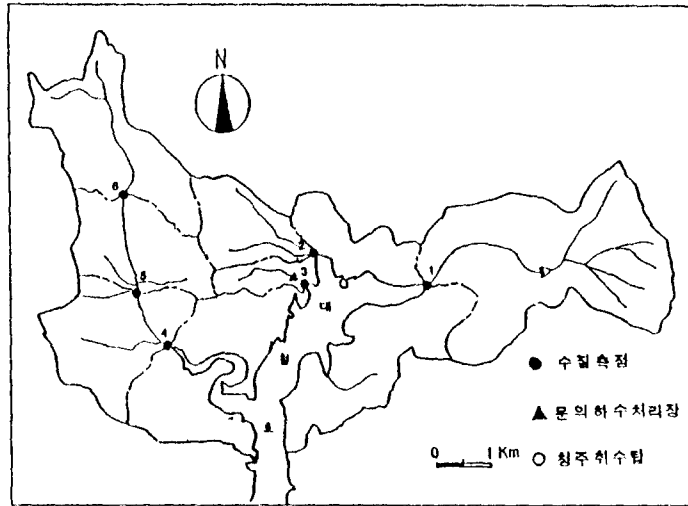


그림 2. 시험유역

6개의 관측지점을 통하여 월간 유출된 오염부하량을 수질항목별로 산정 정리한 결과가 표 1이다.

표 1. 월간 유출부하량(COD, T-N, T-P)

| Site NO. | March | | | April | | | May | | | June | | | July | | |
|----------|--------|--------|------|--------|--------|------|---------|--------|-------|--------|--------|------|--------|--------|------|
| | COD | T-N | T-P | COD | T-N | T-P | COD | T-N | T-P | COD | T-N | T-P | COD | T-N | T-P |
| 1 | 7432.4 | 1617.5 | 29.2 | 900.5 | 161.7 | 3.6 | 19270.8 | 4451.5 | 139.0 | 6907.4 | 1193.6 | 39.9 | 5442.4 | 2079.3 | 78.3 |
| 2 | 2430.6 | 754.0 | 11.0 | 1116.1 | 120.3 | 4.7 | 2185.6 | 589.2 | 23.6 | 1165.6 | 1122.1 | 5.4 | 250.1 | 188.4 | 5.4 |
| 3 | 1622.6 | 158.0 | 16.9 | 1265.4 | 327.9 | 7.3 | 1081.5 | 331.6 | 11.5 | 724.5 | 173.1 | 14.3 | 937.0 | 162.5 | 11.1 |
| 4 | 9179.9 | 2742.4 | 70.4 | 7469.2 | 1742.4 | 16.6 | 20524.0 | 3749.5 | 147.3 | 2430.5 | 235.4 | 3.4 | 372.7 | 178.3 | 2.1 |
| 5 | 4274.7 | 639.1 | 28.9 | 2816.5 | 166.4 | 9.3 | 17306.8 | 1358.5 | 137.7 | 1228.3 | 36.3 | 3.1 | 131.2 | 26.7 | 1.3 |
| 6 | 1974.0 | 2599.0 | 18.2 | 2599.0 | 120.5 | 9.1 | 16163.9 | 1288.6 | 133.7 | 950.7 | 34.5 | 3.1 | 50.8 | 13.5 | 1.0 |

농경지로부터의 유출부하량은 월 변동이 매우 큰것을 알 수 있다. 그 원인으로서는 생활·가축·토지이용계로부터 배출되는 부하량은 비교적 월변동이 없는 것으로부터 경지(전답)으로부터의 배출부하량 변동영향이 나타난 것으로 사료된다.

개발된 BLongRM모형에 대상지역의 환경정보를 입력 data로 하여 각 행정구역별, 월별, 부하계열(생활·가축·경지·토지이용)별의 배출부하량을 추정하였다. 그 예가 그림 3이다. 그림 3은 도시화가 진행된 문의면 사무소가 위치한 미천리와 거의 농경지로 사용되고 있는 품곡리의 결과를 비교한 것으로 배출부하에 미치는 주된 오염부하계열이 판이하고 그 양에도 큰 차이가 있음을 잘 나타내고 있다. 또한 유역별·계절별 배출부하량을 추정한 결과가 그림 4이다.

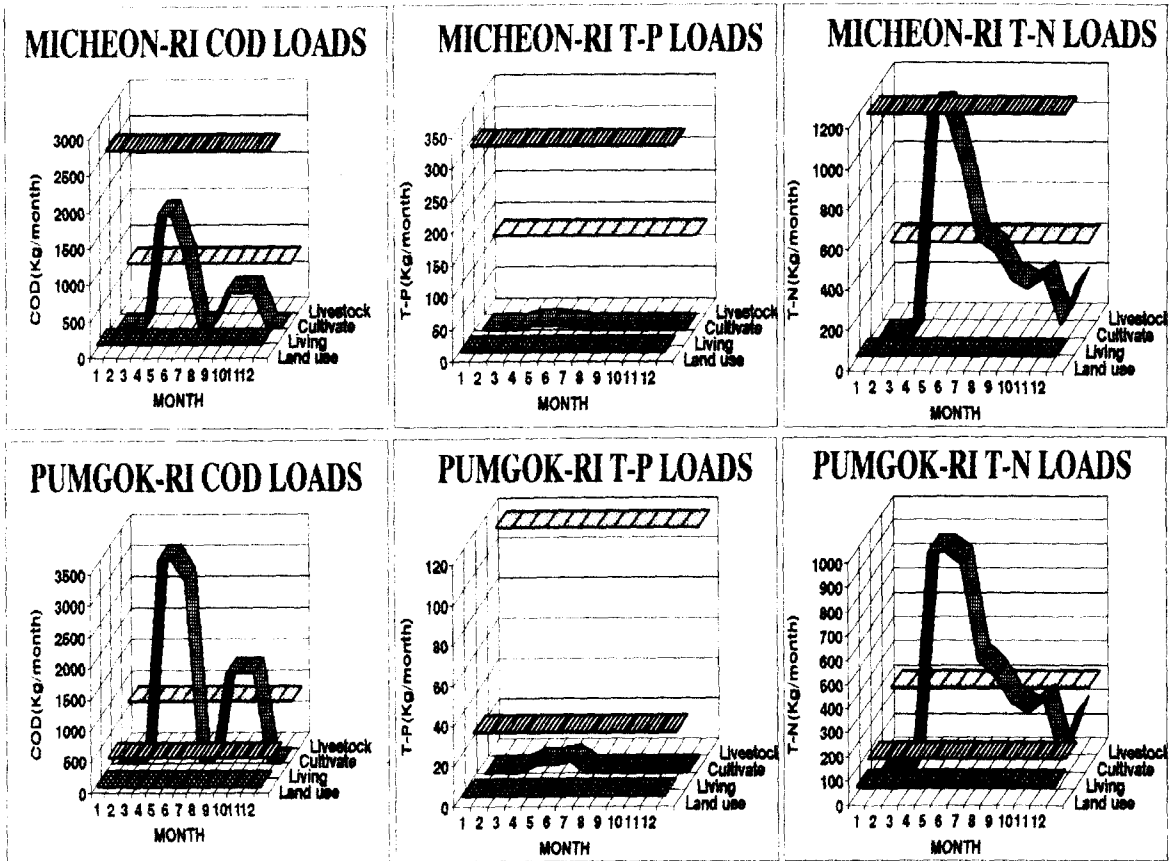


그림 3. 행정구역별 배출부하량 추정결과

이상의 유역별·계절별 배출부하량과 수질 관측점에서의 유출부하량과의 결과를 토대로 대상지역의 부하유출기여율 계수를 수질항목별로 산정한 것이 표 2이다.

표 2. 부하유출 기여율 계수 행렬

| Site | Basin | COD | | | T-N | | | T-P | | |
|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| | | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 |
| 4 | 1.580 | 0.965 | 0.627 | 0.7130 | 0.0834 | 0.0072 | 0.2880 | 0.0141 | 0.0004 | |
| 5 | 0 | 0.611 | 0.397 | 0 | 0.1170 | 0.0101 | 0 | 0.0490 | 0.0014 | |
| 6 | 0 | 0 | 0.650 | 0 | 0 | 0.0860 | 0 | 0 | 0.0280 | |

표의 횡축은 유역 $r(4, 5, 6)$ 을 종축은 수질관측점 $r'(4, 5, 6)$ 으로 Drr' 을 구한 결과이다. 이 기여율 계수행렬을 식 (6)에 대입함으로써 대상유역의 유출부하량과 배출부하량의 동적관계가 명료해진다. 또한 하천 수질 관측점의 수질기준이 설정될 경우 식 (6)의 변형으로부터 각 유역별, 더 나아가 행정구역별·부하계열별의 오염배출부하량 설정기준이 마련될 수 있다.

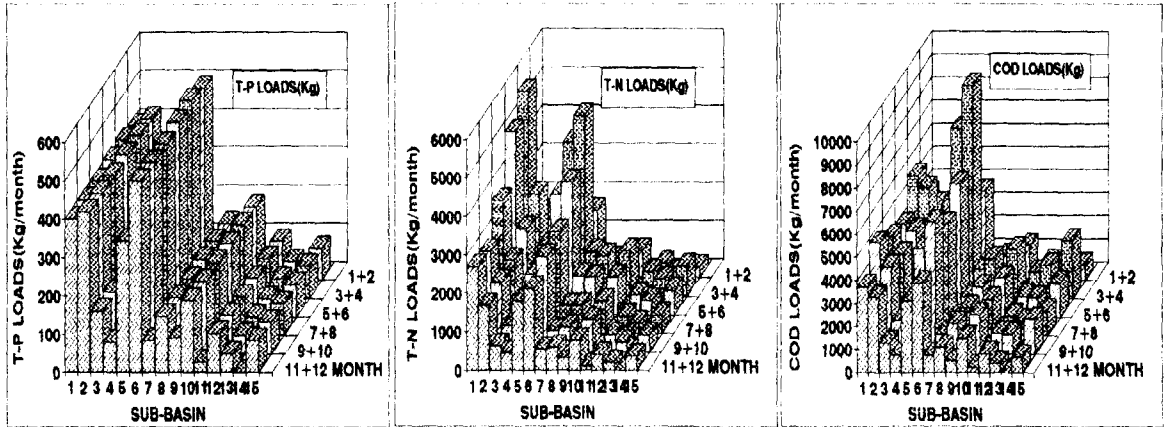


그림 4. 유역별 유출부하량

4. 결론

본 연구는 농경 유역으로부터 배출되어지는 오탁부하의 장기변동 특성을 정량적으로 해석할 수 있는 BLongRM모형을 개발한 것이다. 유역으로부터 실제 관측된 결과를 토대로 모형의 검증을 실시한 결과 모형의 실용성이 입증되었다. 따라서 금후 유역의 개발이 공공수역 수질에 미치는 영향(Load-receptor analysis)분석에 중요한 공학적 수법으로 활용될 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

- Ha, S. R. (1993) Kinematic modelling for washoff on urban non-point source pollutants, Water Science and Technology, (in edition).
- Ha, S. R. and Lee, K. H. (1993) Mathematical modelling of long-term runoff load from rural watershed, Water science and technology, (in edition).
- Kelly, D. et. al. (1987) Developing a strategic assessment and planning framework for the marine environment, J. Env. Mgt., 25, 219-230.