

용담호 소유역별 인 및 부유물질 유입부하량 산정

허우명* · 권상용¹ · 김영길² · 이원호³ · 김범철¹

(삼척대학교 환경공학과, 강원대학교 환경학과¹, 한국수원환경연구센터²,
군산대학교 해양정보과학과³)

Phosphorus and Suspended Solid Loading in Lake Yongdam. Heo, Woomyung*, Sangyong Kwon¹, Younggeel Kim², Wonho Yih³ and Bomchul Kim¹ (Department of Environmental Engineering, Samcheok National University, Samchok, 245-711, Korea. ¹Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, ²Korea; Korea Environmental Research Center for Hydrosphere, Ansan, 425-180, Korea; ³Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea)

Total phosphorus (TP) and suspended solids (SS) were measured in the discharge waters from 5 drainage basins of Lake Yongdam, from April, 2002 till March, 2004. The responses of SS and TP to rainfall were analyzed and their loadings into Lake Yongdam were calculated. The inflowing rivers into Lake Yongdam were the Juja River, the Jeongja River, the Jinan River, the Geum River and the Guryang River. Among these rivers Jinan River showed the highest TP that fluctuated very much according to the flow rate. TP and the flow rates (Q) of each river showed positive correlations with empirical relationship of $TP = 6.32Q^{0.30}$ for the Juja River, $TP = 8.58Q^{0.49}$ for the Jeongja River, $TP = 307.92Q^{0.10}$, for the Jinan River, $TP = 17.91Q^{0.47}$, for the Geum River, $TP = 20.11Q^{0.53}$, for Guryang River. In April 2002~March 2003, phosphorus loadings from the Juja River, the Jeongja River, the Jinan River, the Geum River and the Guryang River were calculated to be 3,677, 11,430, 36,412, 89,651, and 42,226 $kgP \cdot yr^{-1}$ respectively. And the specific loadings from the Juja River, the Jeongja River, the Jinan River, the Geum River and the Guryang River were calculated to be 0.3, 2.9, 13.6, 9.3, and 13.0 $kgP \cdot km^{-2} \cdot yr^{-1}$ respectively. In April 2002~March 2004, the suspended particles loading from the Juja River, the Jeongja River, the Jinan River, the Geum River and the Guryang River were 673, 1,232, 4,232, 36,902, 80,202 $ton \cdot yr^{-1}$ respectively. The Guryang River showed the largest contribution of SS loading.

Key words : Lake Yongdam, phosphorus and suspended solids loading

서 론

국내에는 18,000여개의 크고 작은 호수가 있으며, 이 중 대부분은 수자원의 양적인 확보를 위해 건설된 인공 호수이다. 그러나 대부분의 대형 인공호는 하천에 댐을 축

조하여 건설하였기 때문에 유역의 영향을 받기 쉽고 체류시간이 길어 부영양화되기 쉽다(Kim *et al.*, 1997). 즉, 호수의 부영양화는 유역의 무분별한 개발로 인한 호수 유역의 교란과 생물학적처리에 의존하는 도시하수 정화 시스템, 축산폐수나 농경지 등 비점오염원에 대한 관리 소홀로 인해 유역으로부터 인, 질소부하량이 증가하기 때

*Corresponding author: Tel: 033) 570-6573, Fax: 033) 1 574-7262, E-mail: woomyheo@samcheok.ac.kr

문이다(김 등, 2001). 용담호는 총저수용량이 815.00백만 톤, 저수면적 36.20 km² 및 유역면적 930.00 km²로 금강 상류에 수자원의 효율적 관리를 위하여 건설된 다목적 댐이다(한국수자원공사, 2000). 용담호 담수가 본격적으로 시작된 2001년에는 하류의 대청호가 조성된 이래 가장 긴 시간, 가장 넓은 범위에 걸쳐 조류가 대량 번성하였으며, 여름철 동안 계속해서 대청호 전역에 조류 경보가 발생되어 상수원 취수는 물론 물 이용에 있어서 심한 어려움을 겪은 바 있다(권 등, 2002). 인의 유입량은 유역 내의 인간활동 및 토지 이용현황에 따라 양적인 차이는 있지만 강우에 의한 유량증가에 따라 유출되는 양이 많아진다(Globler and Silberbauer, 1985). 이러한 인의 유입은 호수 부영양화에 직접적인 원인을 제공한다(Schindler and Fee, 1974; Bloesch *et al.*, 1977). 특히 농업 및 임야 등으로부터 기인하는 비점오염원에 의한 영양염류의 과다 유입으로 부영양화 현상이 문제가 되고 있다. 일반적으로 강우시에는 토양유실로 인한 인 유입량이 증가하게 되는데, 이는 인이 흡입자에 부착되어 운반되기 때문이다. 우리나라와 같이 여름철에 강우가 집중되는 환경에서는 인이 흡착된 표토 및 가축 배설물 등이 일시에 하천으로 유입되기 때문에 인의 유입량이 크게 증가한다(허 등, 1998). 우리나라 대형 인공호의 경우 강우시의 인 유입량은 연간 총인 유입량의 70~80%에 해당하는 수준이다(허 등, 1992; 이 등, 1993; Kim *et al.*, 1997; 허 등, 1998, Heo *et al.*, 2002). 그러나 인산염은 진흙이 5% 이상 존재하는 흡입자의 분자구조에 전기적으로 안정되게 결합되어 있으며, 비료를 많이 준 지역에서조차도 쉽게 토양으로부터 물에 용해되어 침출되지 않는다(Cooke and Williams, 1973). 호수의 부영양화는 호수 수중생태계 전반에 걸쳐 악영향을 초래하며 수자원으로서의 가치를 저하시키게 된다. 호수가 부영양화 되면 원상태로 복구하는데는 많은 시간과 재원이 필요하고, 수자원의 질적인 가치하락으로 발생하는 경제적 손실은 댐을 건설하는 비용에 결코 뒤지지 않는다. 따라서 호수의 부영양화를 사전에 예방하는 것이 중요하며 부영양화가 진행된 경우에도 초기단계에서 적절한 대책을 수립 시행하여야 경제적이다(김 등, 1999).

따라서 본 연구는 2001년 10월에 완공된 용담호의 육수생태학적 이해와 향후 수질관리의 기초자료의 정보를 획득하고자 2002년 4월부터 2004년 3월까지 5개의 소유역으로부터 인 및 부유물질을 측정하였으며, 이를 근거로 부하량을 산정하였다.

조사지 유역개황

용담호 유역은 금강유역의 최상류에 위치하며, 북위 36°00'~35°35', 동경 127°20'~127°45'에 걸쳐 있다. 금강은 전라북도 장수군 장수읍 수분리에 위치한 EL. 896.8 m의 신무산 자락의 뜰봉샘에서 발원하여 하류의 북쪽을 향해 흐르면서 EL. 1,614 m의 덕유산에서 발원한 구량천과 우안에서 합류하고, EL. 1,059.7 m의 성수산에서 발원한 진안천과 좌안에서 합류하고, EL. 920 m의 연석산에서 발원한 정자천과 좌안에서 합류하고, EL. 1,125 m의 운장산에서 발원한 주자천과 좌안에서 합류하여 용담댐으로 유입된다. 유역의 고도는 최저 EL. 205.4 m에서 최고 EL. 1,587 m까지 분포하고 있으며, 용담댐의 만수위는 EL. 263.5 m로서 유역 전체가 고지대에 위치하고 있다. 용담호 유역의 지질은 크게 선캄브리아기 변성암류와 중생대의 퇴적암류, 화산암류 그리고 심성암류 등으로 대별된다. 이들 암석들의 분포를 보면 동측은 주로 변성암류와 심성암류가 대부분을 점하고 있으며 서측은 중성 및 산성화산암류가 대부분을 차지하고 있다. 지질구조는 북서-남동방향의 단층선에 의해 지배되고 있다(한국수

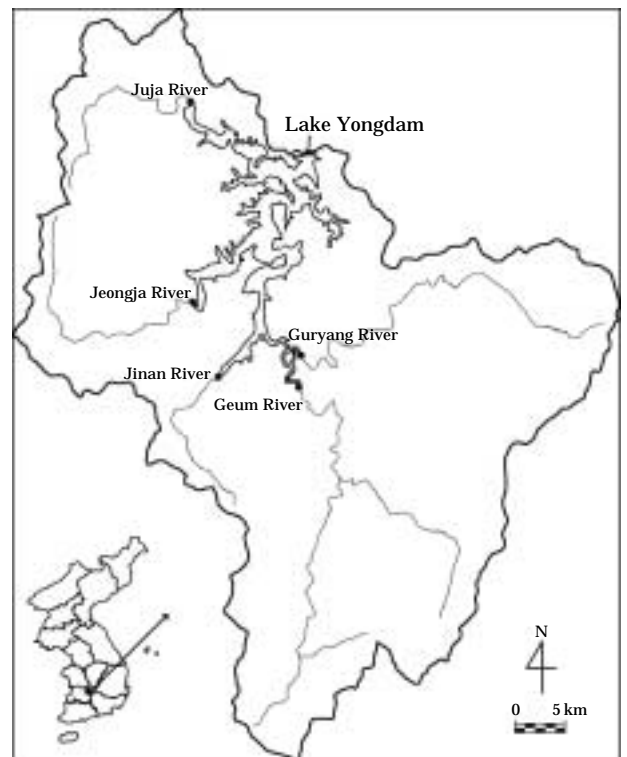


Fig. 1. Map showing the sampling sites.

자원공사, 2003).

재료 및 방법

용담호의 유입수 조사는 주자천, 정자천, 진안천, 금강 및 구랑천에서 실시하였으며 (Fig. 1), 채수는 주 1회를 원칙으로 하였으며, 우기시에는 유량이 큰 시기를 택하여 수시로 실시하였다. 총인은 여과하지 않은 시료를 사용하여 Standard Methods (APHA, 1992)의 persulfate digestion 후 ascorbic acid법으로 측정하였다. 부유물질은 시료를 GF/C 여과지로 여과한 후 105°C에서 2시간 건조 후 무게를 측정하였다.

용담호 유역으로부터의 연간 총인 및 부유물질 (SS) 부

하량은 유량과 농도의 상관관계를 이용한 경험식 (허, 1993; Heo *et al.*, 2002; Heo *et al.*, 2004; 허 등, 2004)을 이용하였는데, 우선 본 연구기간 (2002. 4~2004. 3) 동안 조사한 총인 및 부유물질 농도와 유량을 이용하여 상관관계식을 구한 후, 이 관계식을 이용하여 총인 및 부유물질을 측정하지 않은 날 (day)의 농도를 역산하였으며, 역산된 농도에 유입수량을 곱하여 각각의 일일부하량을 산정한 다음 이를 더하여 연간부하량을 산정하였다. 유입수량은 한국수자원공사 용담댐관리사무소에서 작성된 일간 유량자료 (수자원종합정보, 2004)를 이용하였다.

결 과

조사기간 중 2003년의 경우 강우량은 2,045 mm 정도

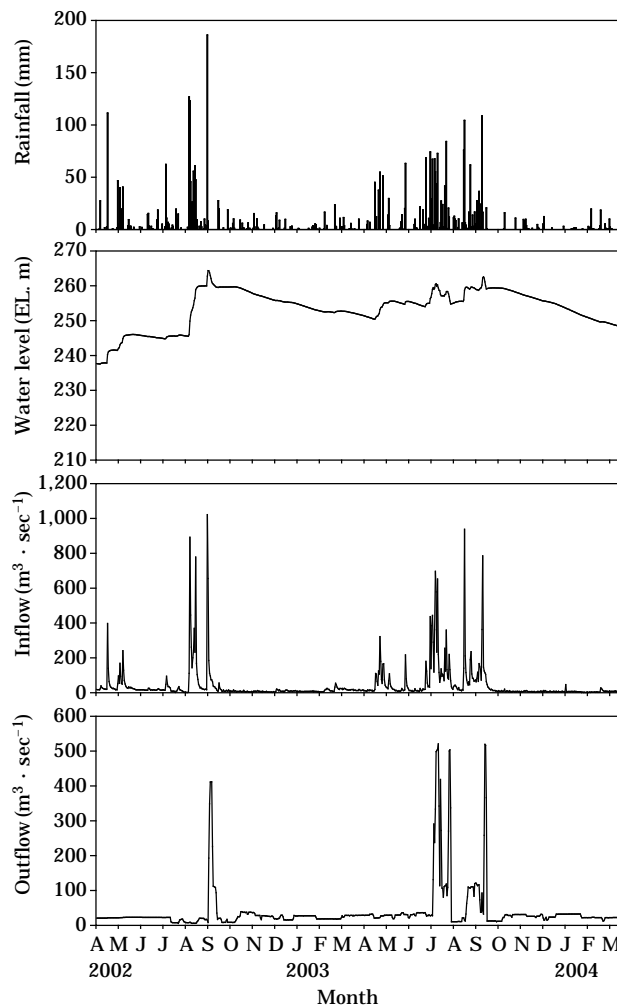


Fig. 2. The variations of hydrological parameters in Lake Yongdam.

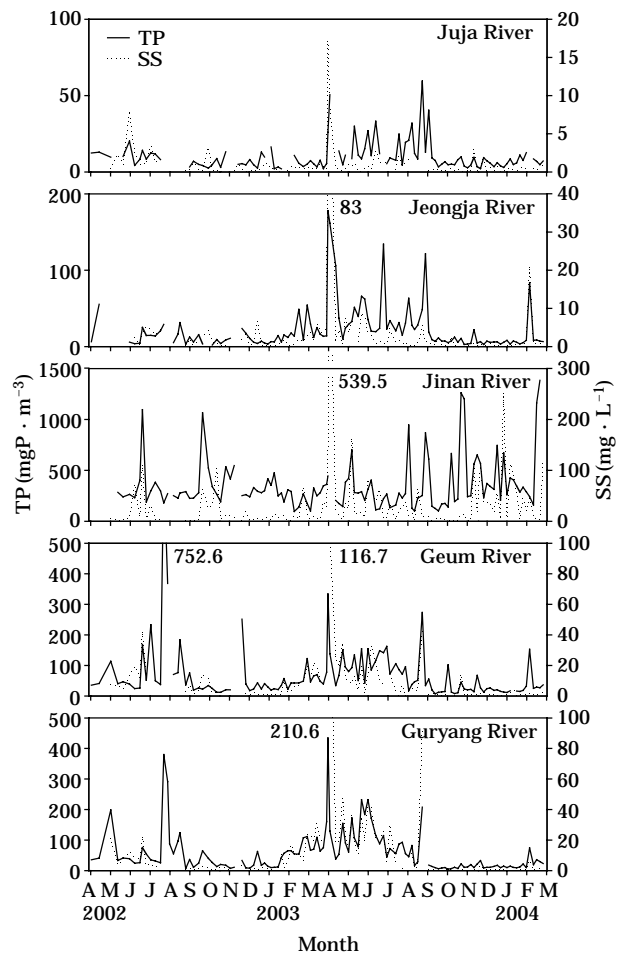


Fig. 3. Variations of total phosphorus and SS concentration in the five inflowing streams of Lake Yongdam.

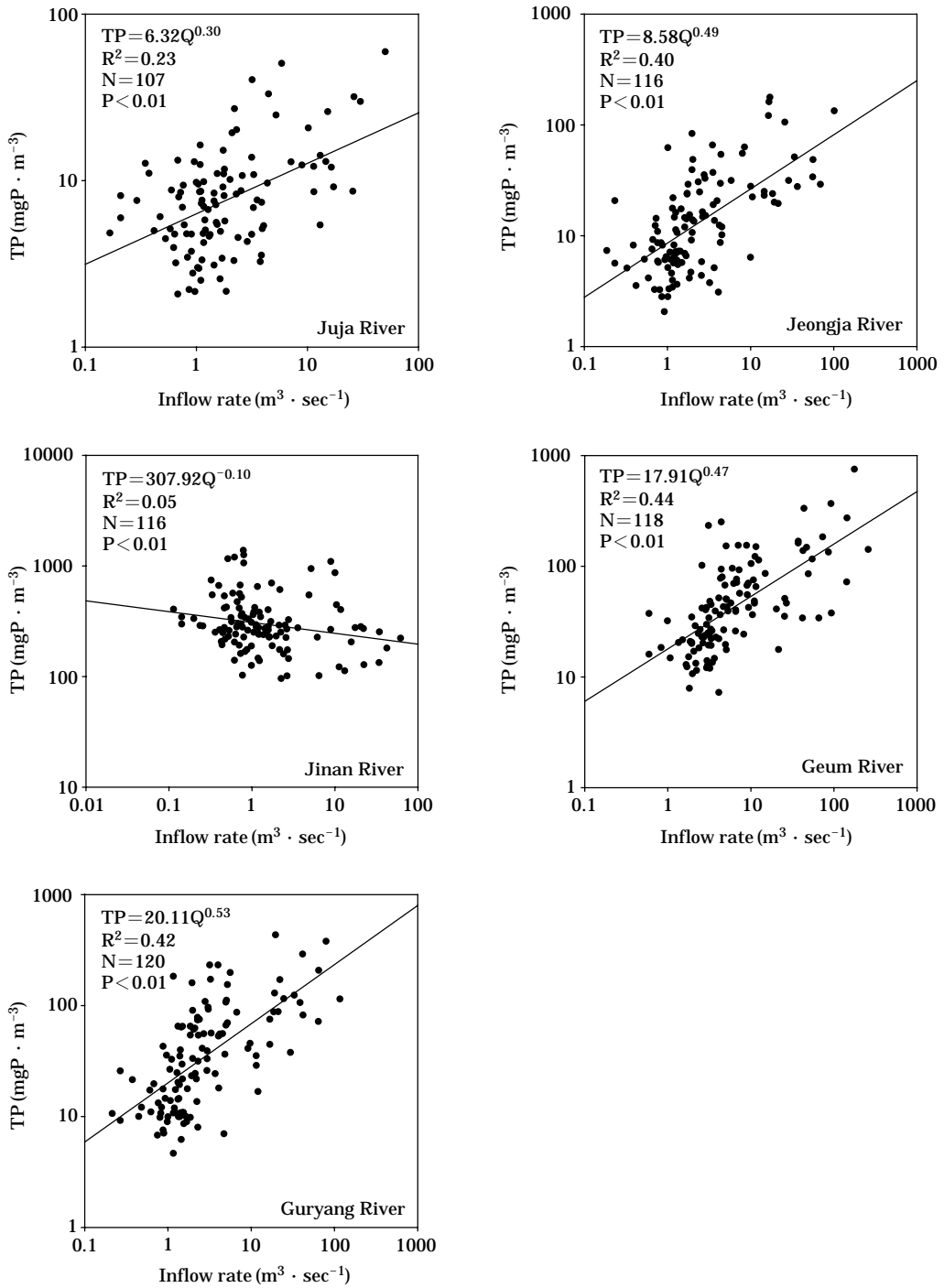


Fig. 4. Plot of inflow rate vs. total phosphorus in the inflowing water.

로 우기인 6~9월 사이에 70% 정도가 집중되었다. 따라서 6~9월 사이에 유입되는 유입수량도 74% 정도로 최대를 보였다(Fig. 2).

용담호 유입수의 총인(TP) 농도는 유량에 따라 변화폭

이 크게 나타났으며, 또한 각 유입하천별 차이도 큰 것으로 나타났다. 유입하천별 총인 농도는 주자천, 정자천, 진안천, 금강 및 구량천에서 각각 2.1~59.5, 2.1~178.0, 96.1~1,384.7, 7.3~752.6 및 4.7~434.1 $\text{mgP} \cdot \text{m}^{-3}$ 로

Table 1. Phosphorus loading of five watershed into Lake Yongdam.

Month	Phosphorus loading (kgP · month ⁻¹)					Total
	Juja River	Jeongja River	Jinan River	Geum River	Guryang River	
Apr., 2002	211	590	2,644	4,664	2,126	10,235
May	233	603	3,114	4,798	2,126	10,874
June	50	94	1,214	767	306	2,430
July	72	155	1,406	1,251	523	3,406
Aug.	1,434	5,167	9,480	40,090	19,710	75,882
Sep.	344	1,093	3,305	8,557	4,060	17,359
Oct.	18	29	584	242	93	966
Nov.	13	20	462	168	63	726
Dec.	27	47	771	387	151	1,383
Jan., 2003	18	28	595	235	89	966
Feb.	50	102	1,103	825	337	2,417
Mar.	91	186	1,863	1,512	619	4,272
Apr.	309	865	3,515	6,851	3,107	14,647
May	156	389	2,318	3,107	1,361	7,331
June	110	268	1,747	2,146	935	5,207
July	1,631	5,407	12,458	42,241	20,205	81,942
Aug.	622	2,067	5,350	16,128	7,762	31,930
Sep.	639	2,034	5,762	15,924	7,548	31,907
Oct.	20	34	647	280	108	1,088
Nov.	14	23	505	190	72	804
Dec.	16	26	550	212	81	884
Jan., 2004	17	32	528	258	102	937
Feb.	15	27	463	224	88	818
Mar.	19	30	612	252	96	1,009

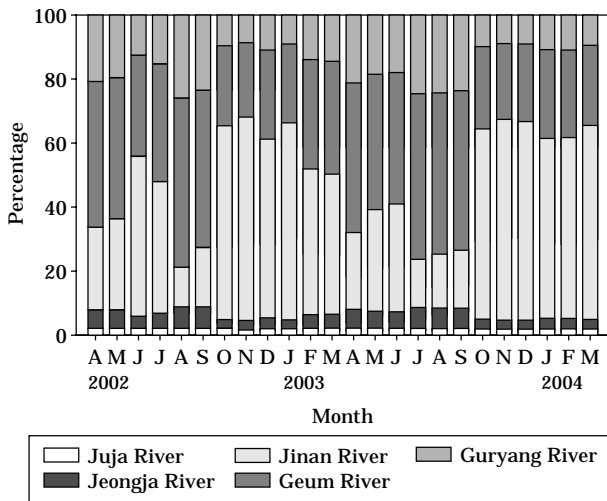


Fig. 5. Relative percentage of total phosphorus loading among the inflowing water.

진안천에서 가장 높았다(Fig. 3). 진안천의 경우 조사기간 중 총인의 농도가 평균 355.7 mgP · m⁻³이었으며, 가정하수의 농도와 유사한 1,000 mgP · m⁻³내외의 농도가 빈번히 관찰되었다.

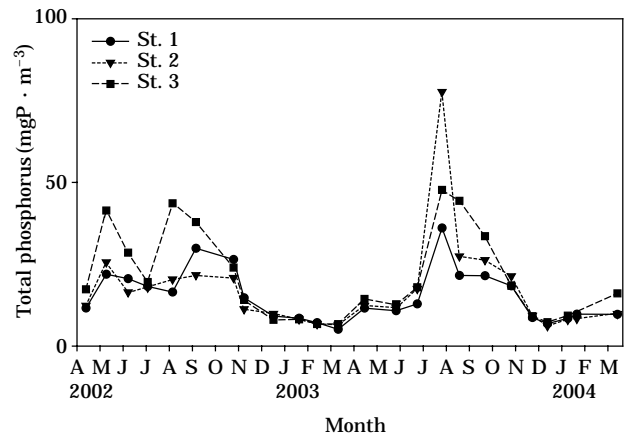


Fig. 6. The monthly variation of total phosphorus in Lake Yongdam. Each point is average TP concentration from 0 to 5 m.

용담호 유입수의 총인 농도와 유량의 관계식은 주자천, 정자천, 진안천, 금강 및 구량천에서 각각 TP = 6.32Q^{0.30}, TP = 8.58Q^{0.49}, TP = 307.92Q^{-0.10}, TP = 17.91Q^{0.47} 및 TP = 20.11Q^{0.53}로 진안천을 제외하고는 양의 상관관계를 보였으며, 각 하천별로 차이가 큰 것으로 조사되었다(Fig.

Table 2. Pollution sources in watershed of Lake Yongdam.

Tributary name	Population (persons)	Livestock			Land area (km ²)		
		Cow	Pig	Poultry	Dry field	Paddy field	Forest
Juja	2,795	90	670	402	12.47	3.25	39.15
Jeongja	3,567	102	84 ⁷	134,661	15.72	5.68	62 ^o
Jinan	12,929	997	2,316	83,881	8.28	3.07	19.87
Geum	21,930	4,498	34,812	4,634	54.95	26.62	200.97
Guryang	9,763	2,192	6,025	43,650	29.77	17.16	115.05

자료: 한국수자원공사 용담댐관리소, 2001

Table 3. SS loading of five watershed into Lake Yongdam.

Month	SS loading (ton · month ⁻¹)					Total
	Juja River	Jeongja River	Jinan River	Geum River	Guryang River	
Apr., 2002	36	69	261	1,648	3,239	5,252
May	39	74	297	1,442	2,466	4,319
June	7	15	77	135	153	386
July	11	22	103	280	388	804
Aug.	285	501	1,483	20,022	48,793	71,085
Sep.	64	116	392	3,658	8,160	12,389
Oct.	2	5	30	35	34	106
Nov.	2	4	22	23	21	71
Dec.	4	8	43	61	65	181
Jan., 2003	2	5	30	33	31	101
Feb.	7	15	75	165	209	471
Mar.	13	27	133	302	374	850
Apr.	54	101	376	2,301	4,227	7,058
May	25	49	205	887	1,474	2,641
June	18	35	147	600	986	1,786
July	310	558	1,772	18,361	40,385	61,386
Aug.	118	212	687	7,409	17,473	25,899
Sep.	119	216	721	6,747	14,948	22,751
Oct.	3	6	34	41	41	125
Nov.	2	4	25	26	25	81
Dec.	2	5	27	29	28	91
Jan., 2004	2	5	28	45	54	135
Feb.	2	4	25	37	42	110
Mar.	2	5	31	36	35	110

4). 용담호의 5개 유입수에서 총인농도와 유입수량으로부터 산출된 식을 이용하여 일일 유입수량으로부터 총인부하량을 계산한 결과 2003년의 경우 주자천, 정자천, 진안천, 금강 및 구량천에서 각각 3,677, 11,430, 36,412, 89,651, 및 42,226 kgP · yr⁻¹로 계산되었으며, 전체 부하량 중 각 유입수가 차지하는 양은 금강(48.9%), 구량천(23.0), 진안천(19.9%), 정자천(6.2%), 주자천(2.0%) 순이었다(Table 1). 또한 단위면적당 부하량은 주자천, 정자천, 진안천, 금강, 구량천에서 각각 0.3, 2.9, 13.6, 9.3 및 13.0 kgP · km⁻² · yr⁻¹로 진안천에서 가장 크게 나타났다.

용담호 전체 유역면적 중 주자천, 정자천, 진안천, 금강

및 구량천이 차지하는 면적비율은 각각 13.8, 15.5, 9.5, 39.5% 및 18.7%로 금강 본류가 가장 크다. 2003년의 경우 각 유입수의 우기시(7~9월) 부하량은 연간부하량의 64.7~84.1%로 구량천에서 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나 '02년 10월부터 '03년 1월까지 그리고 '03년 10월부터 '04년 3월까지의 진안천에서의 부하량 비율이 60%내외로 강우가 적은 기간에 매우 크게 나타났다(Fig. 5). 용담호 유역의 인 발생부하량은 654 ton · yr⁻¹로 가축 및 토지에서의 발생비율이 각각 84.5% 및 11.4%로 전체의 95% 이상을 차지하였다(한국수자원공사 용담댐관리소, 2001). 2003년의 경우 유역에서 발생된 654 ton · yr⁻¹의

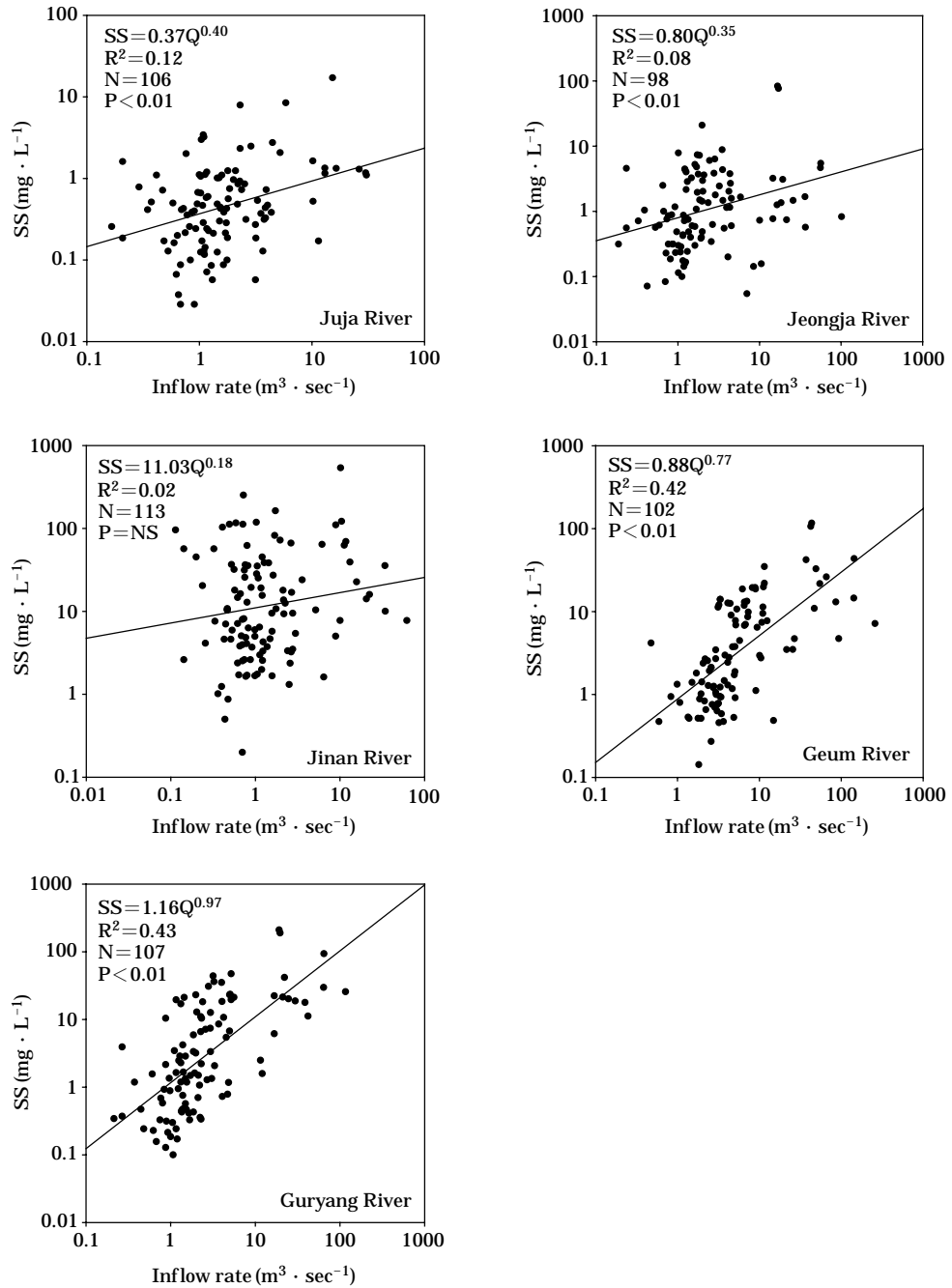


Fig. 7. Plot of inflow rate vs. SS in the inflowing water.

총인 중 $183 \text{ ton} \cdot \text{yr}^{-1}$ 이 호수까지 도달되어 도달율은 28%로 계산되었다. 용담호 표층(0~5 m)의 총인 농도는 정점 1, 2 및 3에서 각각 15.3 ± 8.0 , 17.2 ± 14.5 및 $20.7 \pm 13.6 \text{ mgP} \cdot \text{m}^{-3}$ 로 상류지역에서 높았으며, 계절적으로는 우기기간에 높은 것으로 조사되었다(Fig. 6).

용담호의 유입하천별 부유물질 농도는 주자천, 정자천,

진안천, 금강 및 구량천에서 각각 $0.0 \sim 17.2$, $0.0 \sim 83.5$, $0.5 \sim 539.5$, $0.0 \sim 116.7$ 및 $0.1 \sim 210.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 유량에 따른 변화폭이 큰 것으로 조사되었다(Fig. 3참조). 특히 진안천의 경우 조사기간 중 부유물질 농도가 평균 $31.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 가장 높았다. 용담호 유입수의 부유물질 농도와 유량의 관계식은 주자천, 정자천, 진안천, 금강 및 구

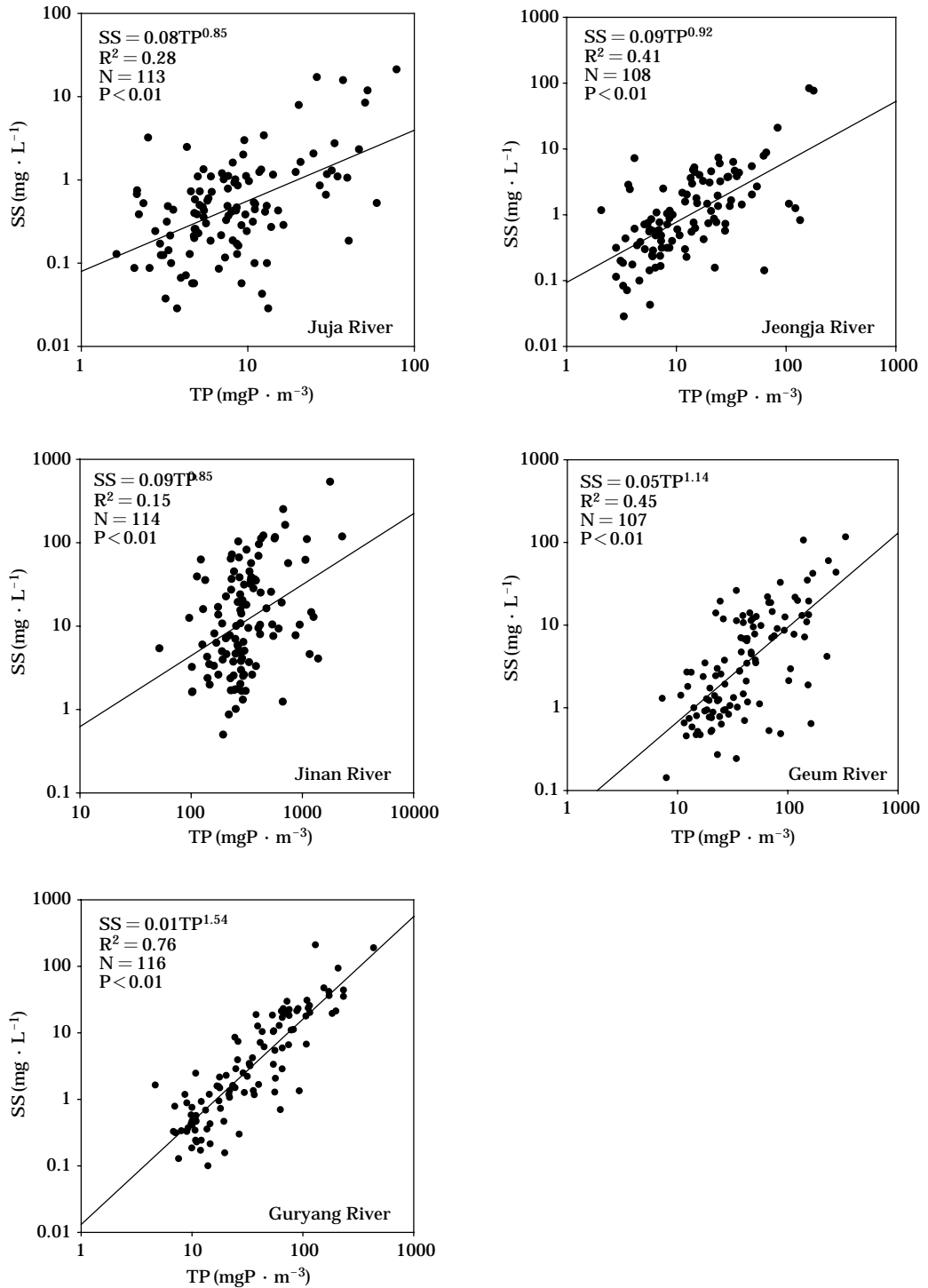


Fig. 8. Plot of TP vs. SS in the inflowing water.

량천에서 각각 $SS = 0.37Q^{0.40}$, $SS = 0.80Q^{0.35}$, $SS = 11.03Q^{0.18}$, $SS = 0.88Q^{0.77}$ 및 $SS = 1.16Q^{0.97}$ 로 양의 상관 관계를 나타냈으나, 주자천, 정자천 및 진안천의 경우 상

관관계가 $R^2 = 0.02 \sim 0.12$ 로 낮았다(Fig. 7).

부유물질농도와 유량의 관계식을 이용하여 일일 유입 수량으로부터 부유물질 부하량을 계산한 결과 '03년의

경우에는 연간 총 123,241 ton · yr⁻¹이 유입되었으며, 강우기간인 7~9월 사이에 연간 부하량의 약 89%가 유입되는 것으로 나타났다. 각 하천별 부하량은 주자천, 정자천, 진안천, 금강 및 구량천에서 각각 673, 1,232, 4,232, 36,902, 80,202 ton · yr⁻¹로 구량천에서 가장 많았다 (Table 3).

용담호 유입수의 총인과 부유물질의 상관성은 대부분 유의한 양의 상관관계 ($R^2 = 0.15 \sim 0.76$)를 보였다 (Fig. 8).

고 찰

일반적으로 하천이나 호수로 유입되는 유입수의 총인 농도는 유량이 많은 우기에 높게 나타난다(허 등, 1998; 안, 2000; 허 등, 2004; 안과 신, 2005). 또한 인은 흡입자에 흡착되어 운반되기 때문에 침식된 지역에서는 강우에 의한 유실이 크게 나타난다. 본 연구결과 용담호의 주 유입수인 주자천, 정자천, 금강 및 구량천의 총인과 부유물질 농도는 강우시에 크게 증가하는 것으로 나타났으나, 진안천의 경우에는 유량이 증가함에 따라 총인 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 진안천의 경우 배경농도가 매우 높아 강우에 의한 오염원의 희석 및 세척효과 때문인 것으로 보인다. 특히 진안천의 경우 유입수의 총인농도가 평균 355.7 mgP · m⁻³로 Likens (1975) 및 Vollenweider (1968)가 제시한 부영양호의 총인 기준인 30 mgP · m⁻³을 10배 이상 초과하는 수준이다. 이는 용담호의 영양상태에 큰 영향을 미칠 것으로 보인다. 용담호로 유입되는 주 유입하천 중 금강유역에서 총인부하량이 가장 크게 나타나는 것은 전체 유역의 39.5%를 차지하는 넓은 유역면적 때문인 것으로 보이며, 단위면적당 부하량은 9.3 kgP · km⁻² · yr⁻¹로 진안천 (13.6), 구량천 (13.0) 다음으로 크게 나타났다. 또한 금강 유역의 인구는 전체 유역 인구의 42.0%를 차지하며, 가축 중 소 및 돼지의 경우 각각 56.1 및 77.9%를 차지하는 등 인구와 가축에 의한 부하량도 매우 클 것으로 보인다 (Table 2). 일반적으로 비점오염원에 의한 오염은 광범위한 토지지역에서 발생하며, 기상의 영향을 많이 받는다 (Drolc *et al.*, 2002). 특히 비점오염원은 소규모의 농가에서 사용하는 축산폐수, 농촌의 생활하수, 농경지와 영농활동, 도로 및 주거지 등에서 발생하는 오염이며, 대표적인 오염물질은 부유토사, 총질소, 총인 등으로 농업지역에서 영농활동으로 인해 많이 발생되고 있다(최 등, 1999). 최 등 (1998)은 유출시험포를 운영하여 유사량이 경운방법과 residue cover에 따라 큰 차이를 보인다고 하였다. 또한 Richardson과 King

(1995)은 경운방법과 작물의 종류에 따라 Sediment 및 영양염의 유실이 크게 변한다고 하였으며, 무경운 재배의 경우 Sediment 및 영양염의 유실을 줄여 장기적으로 하류수자원 보호에 큰 도움을 줄 것이라 하였다. 따라서 농업에 의한 비점원 오염의 중요한 인자인 유사의 배출을 억제하기 위해서는 경운방법 개선과 residue cover의 효율적인 이용방법이 고려되어야 할 것으로 보인다. 또한 경사도가 증가하면 토양입자의 유실이 증가되기 때문에 인의 유실이 증가한다. 경사도가 8°에서 20°로 증가하면 인 유실은 360%, 질소는 200% 증가한다 (Goldman and Horne, 1983). Mitchell 등 (1997)은 Australia에 있는 Herbert River의 경우 우기시 6일 반동안 인 65톤과 부유저니 (suspended sediment) 10만톤이 유역으로부터 유출되었다고 보고하였으며, 이중 85%가 강우초기 처음 2일 동안에 일어났다고 하였다. 또한 이들은 이러한 원인을 유역내에 있는 농경지로부터 유출된 것에 기인한다고 하였다. 이처럼 우기가 시작될 때 인 및 부유물질 부하량이 크게 나타나기 때문에 부하량 저감을 위해서는 초기 강우에 대한 대책이 필요할 것으로 보인다.

진안천의 경우 유역면적이 전체 유역면적의 9.5%에 불과하지만 인부하량은 전체의 19.7%로 유역면적에 비해 총인 부하량이 매우 큰 수준이다. 또한 단위면적당 부하량이 13.6 kgP · km⁻² · yr⁻¹로 가장 크게 나타났다. 한 강수계관리위원회 (2003)에 의하면 북한강 및 남한강 수계에서 각각 8 및 6개 지류에 대한 부하량을 조사한 결과 고랭지 채소밭이 많은 지역에서 단위 면적당 부하량이 크게 나타났다고 하였다. 그러나 본 연구에서는 진안천에서 단위면적당 부하량이 가장 높게 나타난 것으로 보아 토지이용 보다는 유역의 독특한 특성 때문인 것으로 보인다. 즉, 진안 시가지에서 발생된 오염물질이 짧은 하천연장 (8.0 km)으로 인해 곧바로 유출되기 때문일 가능성이 큰 것으로 보인다. 진안천의 경우 진안시가지에서 용담호까지의 거리가 3~4 km에 불과해 다른 유입하천에 비해 자정효과가 덜 일어나기 때문에 부하량이 크게 나타난 것으로 보인다. 또한 진안천의 경우 배경 (background) 농도가 매우 높아 비강우시의 부하량 비율이 매우 높게 나타났다. 권 등 (2002)도 대청호 상류하천 중 진안천에서 BOD, COD 및 TP의 유달부하량을 유역면적으로 나눈 비유달부하량이 가장 높았다고 하였다. 이러한 원인은 진안읍에서 배출되는 각종 오염원의 영향뿐 아니라 좁은 유역면적으로 인해 유역내에서 발생된 오염물질이 토양흡수, 대기증발, 자정작용 등의 자연적인 감소 작용을 일으키는데 충분한 시간적인 여유를 갖지 못하기 때문이라고 지적하였다. 용담호로 유입되는 각 지천

의 부하량 특성은 유역의 특성에 크게 영향을 받으며, 각 지류의 오염부하량에도 많은 차이가 있는 것으로 보인다.

2003년의 경우 용담댐 유역내의 총인발생량이 654 ton 이라고 하였을 때 이중 약 28%가 호수내로 유입되는 것으로 나타났다. 일반적으로 국내의 다른 호수들의 인 유달율이 약 10~20%라고 하였는데 (허, 1993), 용담댐의 경우에는 다소 높은 것으로 나타났다. Heo *et al.* (2002)는 안동호의 총인부하량이 1994~2000년 평균 $64tP \cdot yr^{-1}$ 이라 하였으며, 연간부하량의 70% 정도가 7~9월 사이에 집중된다고 하였다. 소양호의 경우에는 1996년 6월부터 10월까지의 인부하량은 431톤으로 이중 7월의 우기시에 유입된 부하량이 약 394톤으로 전체의 97%를 차지하며, 이는 유역에 산재해 있는 먼오염원인 각종 농경지로부터 인이 흡착된 표토 및 가축 배설물 등이 강우가 집중되는 시기에 일시에 하천으로 유입되기 때문이다 (허 등, 1998). 이 등 (1993)은 대청호의 경우 연간 인부하량이 $138 ton \cdot yr^{-1}$ 이라 하였으며 이중 대부분이 우기에 유입된다고 하였다. 황 등 (1994)은 대청호의 경우 유기물부하량도 전체부하량의 50%가 우기가 집중되는 시기에 유입되었다고 하였다. 허 등 (2004)은 소양호에서 1999~2003년의 총인부하량이 평균 $538 tonP \cdot yr^{-1}$ 이라 하였으며, 1991년부터 2003년까지 총인부하량이 계속적으로 증가하는 경향을 보인다고 하였다. 이러한 원인으로 유역에서 토양을 교란하고 비료와 퇴비의 유출을 증가시키는 활동이 증가했기 때문임을 지적한 바 있다. 이러한 연구결과와 비교해 볼 때 용담호의 경우에도 여름 강우기간에 전체 부하량의 약 70% 이상이 집중되는 것으로 나타나 온대 몬순기후의 영향을 받는 국내 대부분의 호수의 경우와 유사한 부하량 분포를 보이는 것으로 나타났다. Mihara (2001)의 경우에도 유출시험포를 통하여 143.5 mm의 강우가 있었던 1997년 6월 20일의 태풍기간에 인, 질소의 유출량을 조사한 결과 총인 및 총질소의 유출은 대부분 토양입자 및 유기물질의 유실에 의해 일어난다고 하였다. 따라서 토양유실 방지 및 수질 보존을 위해서는 토양보존방법이 매우 중요하다고 지적하였다. 용담호의 경우에도 인부하량을 줄이기 위해서는 강우에 대한 관리가 철저히 이루어져야 하며 강우에 의해 유입될 수 있는 오염원도 정확히 조사되어야 할 것으로 판단된다. 또한 호수의 효율적인 관리를 위해서는 유입수의 오염부하량을 보다 정확하게 산정할 필요성이 큰 것으로 보인다.

용담호 유입수의 총인 및 부유물질은 강우량이 많았던 시기에 높은 농도를 보였으며, 유량과는 대부분 양의 상

관을 보였다. 본 연구에서 산출한 경험식을 이용하여 유량만으로도 총인 및 부유물질의 농도를 추정할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 유입하천 중 주자천과 진안천의 경우 상관관계가 낮아 경향성은 파악할 수 있으나 좀더 정확한 부하량 산정을 위해서는 차후 연구가 더 필요할 것으로 사료된다. 용담호의 경우 각 정점별 인농도는 강우이후 기간에 높게 나타나는 것으로 나타났는데, 이는 소양호의 경우 우기 이후 수온약층이 하강하는 시기에 전 수층에서 인 농도가 높아졌다는 김 등 (1995)의 결과와 유사하다. 온대 몬순기후의 영향을 받는 우리나라의 경우 연간 인 및 부유물질 부하량이 우기기간에 연간 부하량의 70~90%가 유입되는 것으로 보인다. 일반적으로 호수에서 탁도는 우기시 증가되는 것으로 알려져 있으며 (Tanaka *et al.*, 1996; 허 등, 2000; 박 등, 2005), 허 등 (1998)은 소양호에서, 박 등 (2005)의 경우는 안동호에서 우기에 유입수량 증가와 함께 다량의 탁도물질이 호수의 중층으로 유입되고 있음을 밝힌 바 있다. 본 연구에서는 인 및 부유물질의 호수내 거동에 대해서 다루지는 않았지만, 소양호나 안동호의 경우처럼 우기시에 유입수량 증가와 함께 다량의 탁도 물질이 호수의 중층으로 유입되었음을 짐작할 수 있다. 따라서 용담호에서도 허 등 (1998)이 제안한 바와 같이 우기시 중층으로 다량 유입된 오염수괴를 적절한 시기에 방류시킨다면, 우기 이후 전수층에서 인농도가 높아지는 것을 방지하고 식물플랑크톤의 증식을 억제하는데 도움이 될 것으로 보인다.

적 요

2002년 4월부터 5개의 소유역으로부터 인 및 부유물질을 측정하였으며, 이를 근거로 부하량을 산정하였다. 총인 농도와 유량의 관계식은 주자천, 정자천, 진안천, 금강 및 구량천에서 각각 $TP = 6.32Q^{0.30}$, $TP = 8.58Q^{0.49}$, $TP = 307.92Q^{-0.10}$, $TP = 17.91Q^{0.47}$ 및 $TP = 20.11Q^{0.53}$ 로 진안천을 제외하고는 양의 상관관계를 보였다. 2003년의 경우 총인의 부하량은 주자천, 정자천, 진안천, 금강 및 구량천에서 각각 3,677, 11,430, 36,412, 89,651 및 42,226 $kgP \cdot yr^{-1}$ 로 계산되었으며, 전체 부하량 중 각 유입수가 차지하는 양은 금강 (48.9%), 구량천 (23.0%), 진안천 (19.9%), 정자천 (6.2%), 주자천 (2.0%) 순이었다. 또한 단위면적당 부하량은 주자천, 정자천, 진안천, 금강, 구량천에서 각각 0.3, 2.9, 13.6, 9.3 및 13.0 $kgP \cdot km^{-2} \cdot yr^{-1}$ 로 진안천에서 가장 크게 나타났다. 용담호 유입수의 부유물질 농도와 유량의 관계식은 주자천, 정자천, 진안천, 금강

및 구량천에서 각각 $SS = 0.37Q^{0.40}$, $SS = 0.80Q^{0.35}$, $SS = 11.03Q^{0.18}$, $SS = 0.88Q^{0.77}$ 및 $SS = 1.16Q^{0.97}$ 로 양의 상관관계를 나타냈으며, 2003년의 경우 부유물질의 부하량은 주자천, 정자천, 진안천, 금강 및 구량천에서 각각 673, 1,232, 4,232, 36,902, 80,202 $\text{ton} \cdot \text{yr}^{-1}$ 로 구량천에서 가장 많았다

용담호 유입수의 총인 및 부유물질은 강우량이 많았던 시기에 높은 농도를 보였으며, 유량과는 대부분 양의 상관관을 보였다. 용담호의 경우 본 연구에서 산출한 경험식을 이용하여 유량만으로도 총인 및 부유물질의 농도를 추정할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 유입하천 중 주자천과 진안천의 경우 상관관계가 낮아 경향성은 파악할 수 있으나 좀더 정확한 부하량 산정을 위해서는 차후 연구가 더 필요할 것으로 생각된다. 용담호의 경우 인부하량을 줄이기 위해서는 강우에 따른 유출 관리가 철저히 이루어져야 하며 강우에 의해 유입될 수 있는 오염원도 정확히 조사되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 군산대학교 새만금환경 연구센터(군산대학교 RRC)의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

인 용 문 헌

- 권영호, 한선임, 이준배. 2002. 대청호 유역 오염부하량 산정. 상하수도학회지 **16**: 581-595.
- 김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 채기숙. 1999. 국내 주요호수의 육수학적 조사 (3): 진양호. 한국육수학회지 **32**: 111-126.
- 김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 최종수. 2001. 국내 주요 호수의 육수학적 조사 (4): 주암호. 한국육수학회지 **34**: 30-44.
- 박재충, 박정원, 신재기, 이희무. 2005. 인공호에서 문순과 태풍 강우에 의한 고탁수층의 이동과 소멸특성. 한국육수학회지 **38**: 106-117.
- 수자원종합정보. 2004. wamis.kowaco.or.kr.
- 안광국, 신인철. 2005. 산간 계류형 하천의 계절적 수질변동에 대한 문순강우의 영향. 한국육수학회지 **38**: 54-62
- 이기중, 허우명, 김범철. 1993. 대청호 유역과 가두리양어장으로부터의 인부하량과 인수지. 한국수질보전학회지 **9**: 139-144.
- 최중대, 김정제, 양재의, 정진철, 윤세영. 1998. 산지에서의 환경보전형 농업을 위한 토양의 질 평가. 한국농공학회지 **40**: 502-510.
- 최중대, 이찬만, 최예환. 1999. 토지이용이 농업소유역의 수질에 미치는 영향. 한국수자원학회논문집 **32**: 501-510.
- 한강수계관리위원회. 2003. 탁수로 인한 수중생태계 영향조사 및 저감대책 제시. 195pp.
- 한국수자원공사. 2000. 용담다목적댐 건설사업 수질대책보고서. p 17.
- 한국수자원공사. 2003. 2003년 용담댐 일원 하천유량측정등 수문조사 보고서. 400pp.
- 허우명. 1993. 소양호의 부영양화와 남조류 bloom에 관한 연구. 강원대학교 박사학위논문
- 허우명, 김범철, 안태석, 이기중. 1992. 소양호 유역과 가두리로부터의 인부하량 및 인수지. 한국육수학회지 **25**: 207-214.
- 허우명, 김범철, 김윤희, 최광순. 1998. 소양호 유역에서 비점오염원의 홍수유출과 오염수괴의 호수내 이동. 한국육수학회지 **31**: 1-8.
- 허우명, 김윤희, 최광순, 김범철. 2004. 소양호 유역의 탁수발생과 인부하량 변동. 제12회 세계 물의 날 기념 심포지엄 「소양호 생태계의 특성과 보존」. p121-136
- 황길순, 김동섭, 허우명, 김범철. 1994. 대청호의 일차생산과 가두리양어장 및 유역으로부터의 유기물부하량. 한국육수학회지 **27**: 299-306.
- An, K.G. 2000. Monsoon inflow as a Major Source of in-lake Phosphorus. *Kor. J. Limnol.* **33**: 222-229.
- APHA (American Public Health Association), 1992. "Standard Methods for the examination of water and wastewater 18th ed", Washington D.C.
- Bloesch, J.P., P. Stadelman and H. Buhner. 1977. Primary production and sedimentation in the euphotic zone of two Swiss lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 511-526.
- Cooke, G.W. and R.J.B. Williams. 1973. Significance of man-made sources of phosphorus: Fertilizers and farming. The phosphorus involved in agricultural systems and possibilities of its movement into natural water. *Water Res.* **7**: 19-33.
- Drolc, A. and J. Zagorc Koncan. 2002. Estimation of sources of total phosphorus of total phosphorus in a river basin and assessment of alternatives for river pollution reduction. *Environent International.* **28**: 393-400.
- Globley, D.C. and M.J. Silberbauer. 1985. The combined effect of geology, phosphate sources and runoff on phosphate export from drainage basin. *Water res.* **19**: 975-981.
- Goldman, C.R. and A.J. Horne. 1983. *Limnology*. McGraw-Hill. NewYork.
- Heo, W.M, S.Y. Kwon and B. Kim. 2002. Long-term Variations of Trophic State and Phosphorus Loading in Lake Andong, Korea. *Kor. J. Limnol.* **35**: 249-256.
- Heo, W.M, S.Y. Kwon and B. Kim. 2004. The Limnological

- Survey and Phosphorus Loading of Lake Hoengsung. *Kor. J. Limnol.* **37**: 411–422.
- Kim, B. 1987. An ecological study of phytoplankton in Lake Soyang. Ph. D. Thesis. Seoul Nat. Univ.
- Kim, B., J.H. Park, G. Hwang and K. Choi. 1997. Eutrophication of Large Freshwater Ecosystem in Korea. *Kor. J. Limnol.* **30**: 512–517.
- Likens, G.E. 1975. Primary production of inland aquatic ecosystem. In H. Lieth and R.H. Whittaker (eds). Primary productivity of the biosphere. Springer Verlag. New York. pp. 185–202.
- Mihara, M. 2001. Nitrogen and Phosphorus Losses due to Soil Erosion during a Typhoon, Japan. *J. Agric. Engng Res.* **78**: 209–216
- Mitchell, A.W., R.G.V. Bramley and A.K.L. Johnson. 1997. Export of nutrients and suspended sediment during a cyclone-mediated flood event in the Herbert River catchment, Australia. *Mar. Freshwater Res.* **48**: 79–88.
- Richardson, C.W and K.W. King. 1995. Erosion and Nutrient Losses From Zero Tillage on a Clay Soil. *J. Agric. Engng Res.* **61**: 81–86.
- Schindler, D.W. and E.J. Fee. 1974. Experimental Lakes Area: Whole lake experiments in eutrophication. *J. Fish Res. Bd. Can.* **31**: 973–953.
- Tanaka, Y., T. Kimoto and R. Tsuda, 1996. Turbid water penetration from yasui River into Lake Biwa at the seasonal thermocline. *Jpn. J. Limnol.* **57**: 475–465.
- Vollenweider R.A. 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication, OECD Technical Report, DAS/CSI/68.27.

(Manuscript received 10 June 2005,
Revision accepted 31 August 2005)