

장마기의 강우가 낙동강 하류(물금) 수질에 미치는 영향

박성배¹ · 이상균^{1,2} · 장광현^{1,3} · 정광석¹ · 주기재^{1,*}

¹부산대학교 생물학과, ²강원대학교 환경과학과, ³信州大學 陸水環境教育研究센터

The Impact of Monsoon Rainfall (Changma) on the Changes of Water Quality in the Lower Nakdong River (Mulgeum). Park, Sung-Bae¹, Sang-kyun Lee^{1,2}, Kwang-Hyeon Chang^{1,2}, Kwang-Suek Jeong¹ and Gea-Jae Joo^{1,*} (1Dept. of Biology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea, 2Dept. of Environmental Science, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea, 3Research and Education Center for Inlandwater Environment, Shinshu University, Kogandori 5-2-4, Suwa 392-0027, Japan)

The impact of summer monsoon on water quality of the lower Nakdong River was evaluated during the summer (June-August) in 1997. Several limnological variables were measured in the interval of 1~3 day using an automatic monitoring system (Hydrolab Recorder™) to detect water quality changes caused by rainfall on one-hour basis. During the monsoon period (from late June to mid July), 5 times of major rainfall events of >50 mm were recorded in the river basin. Dynamic changes of water quality were observed during the monsoon, and the first rainfall event (June 25~27) had a significant influence on the water quality at the lower part of the river. All parameters were largely changed due to the first rain event, and the changed level was maintained until the end of monsoon period. Nutrient concentrations and turbidity increased and values of the other parameters were declined as a result of water dilution. This rainfall event, Changma, is a meteorological phenomenon caused by the East-Asian monsoon climate. The magnitude and frequency of the rainfall during the early monsoon play an important role in change of water quality and ecosystem characteristics of large river systems.

Key words : summer monsoon, water quality, Nakdong River

서 론

하천생태계는 물의 흐름이라는 특성에 의하여 호수나 저수지와 같은 정수생태계와 구분이 된다(윤, 1998). 물의 흐름은 지속적으로 수체의 물리·화학적 요인 뿐만 아니라 먹이망 구성 요소에 교란을 주며(Burt, 1992; Reynolds, 1992), 이러한 수리·수문학적 양상이 변화할 경우 하천내의 생물들은 직접적으로 큰 영향을 받게 된다. 하천의 흐름에 영향을 줄 수 있는 주요 요소는 강우, 하상구조, 인공구조물, 인위적인 수자원의 유입 및 유출

등이 있으며, 이들이 복잡하게 시·공간적으로 결합하여 하천생태계의 역동성이 결정된다. 강우와 유량의 변화에 따른 담수생태계 동태 연구는 다양하게 진행되어 왔는데, 특히 강우에 의한 하천 수질의 변화, 영양염류 및 토사의 이동, 이온물질의 농도변화 등의 연구가 비교적 많이 이루어졌다(Likens *et al.*, 1977; Pringle *et al.*, 1988; S.H.G.N., 1990; Meybeck *et al.*, 1992).

우리 나라의 하천생태계는 하계에 편중된 강우(장마, 집중호우, 태풍 등)에 의해 매년 주기적으로 교란을 받고 있다. 동남아시아권에서 관측되는 몬순(monsoon)과 연 3~5차례 직접적인 영향을 미치는 태풍에 의하여 연

* Corresponding author: Tel: 051) 510-2258, Fax: 051) 582-2962, E-mail: gjjoo@pusan.ac.kr

강우량의 50% 이상이 하계에 발생한다. 특히 겨울부터 이듬해 봄까지는 강우가 적어 하천생태계의 하계 동태는 다른 계절과 뚜렷이 구분될 수 있다. 하계에 편중된 강우로 인한 홍수는 하천 및 호소생태계의 물리·화학적 특성에 직·간접적인 영향을 미치는 요인으로 평가되고 있다.

최근 국내에서도 강우현상이 담수생태계에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 시작되었다. 김 등 (1995)이 소양호에 유입되는 인의 총량이 여름 장마기간에 큰 폭으로 증가하고, 장마 이후 약 2~3개월 동안 높은 농도가 호수 내에서 유지되어 호소수질 관리에 있어 중요한 요소임을 밝혔다. 또한 Kim *et al.* (2000)은 몬순 기간중의 강우에 의하여 대형 호수의 탄소 함유량 분포가 결정된다고 보고하였고, An (2000a, b, c)은 대청호에서 몬순에 의한 호수내 용존산소의 변화, 유입되는 인의 동태와 호수의 형태 및 수리·수문학적 변동에 대한 몬순강도의 영향을 평가하였다. 대부분의 연구가 호수내에서 강우에 대한 영향을 평가한 연구들로 강에서 몬순의 영향을 평가한 경우는 적었고, 특히 몬순 기간 동안 초기 강우는 수질에 큰 영향을 줄 것으로 사료되나 이에 관한 정량적인 평가는 미흡한 실정이었다.

낙동강에서는 80년대 중반 이후 하류를 중심으로 수질 및 동·식물 플랑크톤에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있으며, 90년대 이후 조사간격이 월간 또는 격주간으로 짧아져 계절별 수질변화는 비교적 잘 파악되고 있다 (Ha *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2001). 그러나, 수질 변화를 결정하는 요인에 대한 연구는 다소 미진한 실정이며, 연주기로 발생하는 장마의 영향에 대해서는 밝혀진 바가 적었다. 또한 강우가 적은 초겨울부터 봄에 이르는 갈수기 이후에 늦봄과 초여름에 발생하는 집중강우의 영향 역시 연구된 사례가 없었다.

본 연구는 낙동강에서 1997년 하계 장마기간 강우가 수질에 미치는 영향을 파악하기 위해 6월부터 8월까지 낙동강 하류(물금)에서 수질항목을 측정 분석하였다. 동시에 자동 수질측정장비 (Hydrolab Recorder™)를 이용하여 장마 초기강우 전후에 1시간 단위로 기초수질 및 수위변화를 모니터링하고 낙동강 하류(물금)의 수질에 미치는 장마 초기강우의 영향을 조사하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

우리 나라는 지리적으로 북반구의 극동부에 위치하고

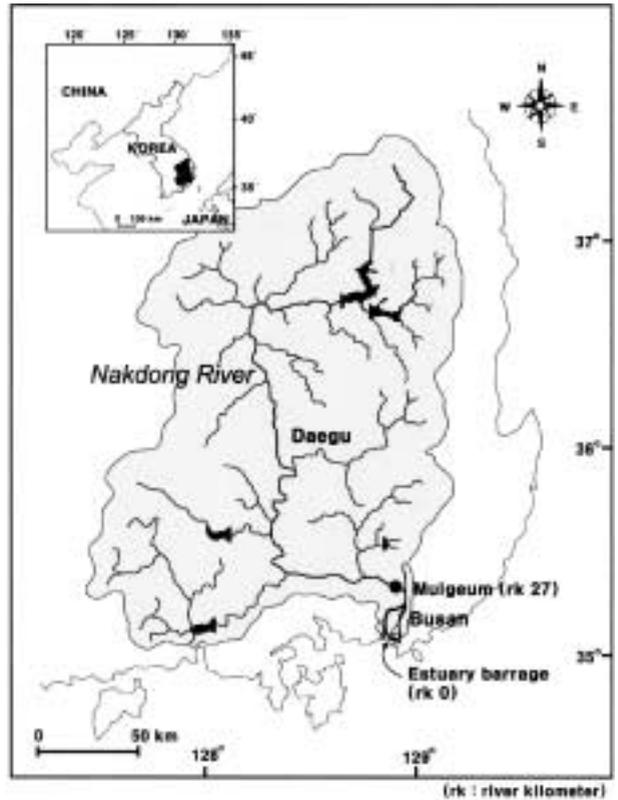


Fig. 1. The Nakdong River basin and the study site (●, Mulgeum).

있으며 뚜렷한 계절의 변화를 가진 온대성 기후대에 속한다. 낙동강은 국내에서 두 번째로 큰 강생태계(하천길이: 521.5 km; 유역면적: 23,817 km²)로 상류에서부터 하류에 이르기까지 약 1천 만 명의 유역 주민이 상수원 및 농·공업용수로 활용하고 있으며, 본류와 지류에 주요 7개 댐(안동, 임하, 합천, 남강, 영천, 밀양, 운문댐)과 하구둑에 의하여 강의 흐름이 조절되고 있다. 낙동강은 상류지역에서부터 집약적인 토지이용과 수자원의 이용에 의해 하류역에서는 상당한 부영양화가 진행되어, 매년 여름의 남조류와 겨울의 규조류의 대번성이 관찰되고 있다 (Joo *et al.*, 1997; Ha *et al.*, 1999).

조사지점은 경상남도 양산군 물금읍에 위치한 물금 취수장으로 (Fig. 1), 하구둑으로부터 약 27 km 상류에 위치해 있고 1970년 이후 부산광역시 화명정수장의 원수 취수장으로 활용되고 있으며, 인접한 매리 취수장과 함께 1일 약 250만 톤의 물을 취수하고 있다.

2. 조사방법 및 조사항목

1) 기상 및 수리자료

조사기간 동안의 낙동강 집수역의 대표적인 기상 관측지점인 대구, 밀양, 진주, 합천, 안동의 강우자료(기상청자료)를 이용하였으며, 지역별 강우의 산술평균을 통하여 평가하였다. 조사기간의 유량은 부산광역시 홍수통제소로부터 물금에서 가장 가까운 지점인 삼랑진 통과 유량자료를 이용하였고, 수위는 물금취수장의 취수탑 상단으로부터 100 cm 아래지점(낙동강 물금지점의 평수위)에 기준점을 설치하고 수질조사시 수위변화를 기록하였으며, 수위 자동측정은 취수탑 철구조물 고정점에 설치한 수질 자동측정장비를 이용하였다.

2) 이화학적 수질 분석

1997년 하계 6월에서 8월까지 1~3일 간격으로 육수학적 변수를 현장과 실험실에서 측정 및 분석하였다. 조사방법은 수심 0.5 m에서 시료를 채수하여 항목에 따라 현장에서 직접 측정하거나 실험실에서 측정하였다.

수온은 YSI DO meter (Model 58)의 온도계로 현장에서 측정하였고, Secchi 투명도는 직경 20 cm의 원판을 이용 측정하였으며, 탁도는 Shaban turbidimeter (Model 11052)로 시료당 7회 측정하여 평균값을 구했다. pH는 Orion pH meter (Model 407A)를 이용하여 측정하였고, 용존산소는 YSI DO meter (Model 58)로 현장에서 측정하거나, Wetzel과 Likens (1991)에서 제시된 Winkler Method로 현장에서 시료를 고정한 후, 실험실로 운반하여 측정하였다. 전기전도도는 Fisher conductivity meter (Model 152)를 이용하였고, 알칼리도의 측정은 Titration Method (0.02 N H₂SO₄로 적정하여 pH 4.5를 끝점으로 맞춤)를 따랐다. 영양염류는 항목에 따라 원수와 원수를 0.45 μm Whatman 유리섬유여과지 (GF/C)로 여과시킨 시료를 냉장 또는 냉동 보관해 두었다가 Wetzel과 Likens (1991)에서 제시된 방법 (SiO₂: 흡광광도법)과 Lachat Ion Analyzer (NO₃⁻-N: 10-107-04-1-O, NH₄⁺-N: 10-107-06-10-B, PO₄³⁻-P: 10-115-01-1-B, TN: 10-107-06-2-E, TP: 10-115-01-1-E)를 이용하여 측정했다.

자동측정 조사항목은 Hydrolab Recorder™를 이용하여 수위, 수온, 전기전도도 및 용존산소농도(% 포화도)를 측정하였다. 수질 자동측정장비를 취수탑 철구조물의 수심 1 m 지점에 설치한 후 약 15일 간격으로 기기보정을 하였으며 측정된 자료를 휴대용 컴퓨터로 옮긴 후 실험실에서 평가하였다. 수질항목은 하계에 1~3일 간격으로 조사하였고, 자동측정은 선택된 수질항목(수온, 수위, 수소이온농도, 전기전도도, 용존산소농도)을 매 시간 연속적으로 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 집수역의 강우양상 분석

지난 20~30년간의 낙동강 집수역내 주요 기상관측지점의 연평균 강우량 분포는 지역 및 계절적인 차이를 보였다(Table 1). 연평균 강우량은 안동 1,007 mm, 대구 1,030 mm, 합천 1,287 mm, 밀양 1,233 mm, 진주 1,538 mm로 지역별로 약 500 mm 이상의 차이를 보였는데 일반적으로 남부 지역로 향할수록 강우량이 증가하는 양상을 보였다. 강우 양상 또한 뚜렷한 연간변이를 보였으며, 하계에 연간 강우의 50% 이상이 집중되는 현상을 보였다(Fig. 2A). 1997년의 하계 강우량은 하계의 평균 강우량에 비해 다소 많았으며 특히 장마기에 많은 강우가 발생하였다(Fig. 2B). 1997년의 장마는 6월 24일부터 낙동강 집수역에서 전체적으로 비슷한 시기에 시작되었고 7월 17일을 전후로 종료되어 약 20여 일간 지속되었다(Fig. 2C). 장마 초기인 6월 25일에서 27일 사이 낙동강 집수역(안동: 100 mm, 대구: 137 mm, 합천: 138 mm, 밀양: 315 mm, 진주: 159 mm)에 전체적으로 많은 양의 비가 내렸다. 초기강우 이후 집수역 전체에서 약 4~5일 간격으로 50 mm 이상의 강우가 4회에 걸쳐 발생했다. 1997년 장마기간 동안의 주요 지역별 강우량은 여름(6~8월) 강우량의 약 65%에 해당하는 양이었다.

우리나라의 연간 강우량은 지역적으로 차이는 있으나

Table 1. Seasonal patterns of precipitation at 5 representative sites within the Nakdong River basin (1961~1998).

	Spring (Mar.- May)	Summer (Jun.- Aug.)	Autumn (Sep.- Nov.)	Winter (Dec.- Feb.)	Total Precipi- tation	Remarks
Andong	197* (20)**	574 (57)	161 (16)	75 (7)	1007 (100)	'86-'98
Daegu	204 (20)	555.1 (54)	208.2 (20)	63.4 (6)	1030.6 (100)	'61-'90
Hapcheon	258.3 (20)	712.4 (55)	239.2 (19)	77.3 (6)	1287.2 (100)	'73-'90
Miryang	267.2 (22)	662.1 (54)	230.6 (19)	72.8 (6)	1232.7 (100)	'73-'90
Jinju	352.9 (23)	807.4 (52)	275.4 (18)	102.5 (7)	1538.2 (100)	'70-'90
Mean	256 (21)	662 (54)	223 (18)	78 (6)	1219 (100)	

* : mean precipitation (mm)

() ** : % of total annual precipitation

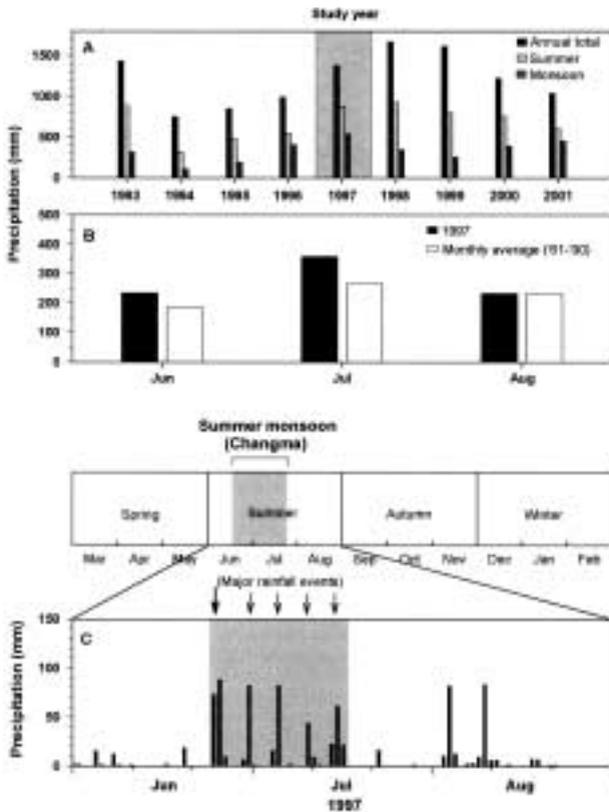


Fig. 2. Annual precipitation pattern (A), the comparison of the average precipitation between 1997 and last 30 years (1961~1990) (B), and the precipitation during the monsoon period in 1997 (C).

약 1,300 mm 정도로 세계 평균 강우량(약 900 mm)에 비해 상대적으로 풍부하지만 강우량의 50% 이상이 하절기 6~8월 사이에 집중되는 특성을 가지고 있다. 1997년 하계(6~8월) 낙동강 집수역의 강우는 지역별로 다소 차이는 있으나 대체로 비슷한 강우양상과 강우량을 보였고, 이 기간 중 월별 강우량은 예년의 월별 강우량 평균보다 다소 많거나 유사했다(박, 1998). 여름기간 장마, 집중호우, 태풍 등의 강우시기를 제외하고는 10월부터 이듬해 5월까지 강우량이 상대적으로 적어 대조를 이룬다(기상청, 1991, 1995). 우리나라의 장마는 동남아시아의 계절풍(monsoon)과 연관되어 나타나는 기상현상으로 6월 하순에서 7월 중순까지 지속되며 중국과 일본 등지에서도 유사하게 발생한다. 과거부터 이러한 계절풍에 대한 연구는 많이 이루어졌으며, 특히 기상학적으로 담수생태계에 미치는 영향 역시 최근 중요한 연구분야의 하나이다.

2. 하계의 수질변화

1997년 여름기간 중 낙동강 하류 물금에서 물리·화학적 환경요인에 급격한 변화가 일어난 시기는 장마 초기강우를 전후해서였다. 대부분의 항목이 장마 초기강우가 시작된 6월 25일에서 27일 사이 가장 큰 변화가 있었고, 7월 중순 장마종료 이후 서서히 회복되다가 8월초의 집중호우로 다시 영향을 받았다(Fig. 3).

1) 이화학적 요인

강우현상은 담수생태계에 물리적으로 영향을 주는 중요한 요소들 중 하나이다. 특히 몬순(Monsoon)과 같은 기상현상이 동반하는 장마는 강한 계절성을 가지며 동시에 연간변화도 나타난다. 여기에 강우의 시·공간적 불균등성은 더욱 복잡하게 작용하여 수환경의 물리적인 변화에 중요한 역할을 하는 것으로 보인다. 강우에 따른 수질 항목의 변화는 뚜렷하였으며, 특히 최초 강우 이후 후속되는 강우 현상에 의하여 수질 변화가 유지되었다. 유량은 장마 초기강우 전후로 약 2000 CMS 이상의 증가를 보이기도 하였으나 이어지는 강우에 의해 큰 폭의 변화를 보였다(Fig. 3A). 일평균 기온은 6월부터 8월 중순까지 전반적으로 상승하여 20°C 이상을 유지했으나(Fig. 3B) 장마기간동안 감소하여 최저 20.3°C를 기록해 여름 기간 중 가장 낮았다. 장마가 끝난 7월 중순에서 8월 상순까지 기온은 크게 증가하여 일평균 27°C 내외를 유지하였다. 장마와 강우기간을 제외한 하계에는 일교차가 10°C 내외였으나 장마기간 중에는 일교차가 5°C 내외로 적었다. 조사기간의 평균수온은 25°C 내외였으며 수온변화는 전체적으로 기온 변화와 유사한 양상을 보였고 장마기간동안 낮은 수온이 유지되었다(Fig. 3C).

탁도와 secchi 투명도는 특히 6월 25일부터 시작된 장마 초기강우 전과 후에 큰 차이를 보였다. 장마기간동안 탁도와 secchi 투명도는 각각 44.4 ± 59.2 NTU (1.8~235 NTU), 57.1 ± 38.2 cm (7~145 cm) 정도의 변화폭을 보였다(Fig. 3D). 탁도는 총부유물질의 양을 직접적으로 반영하는 항목으로 장마기간 중 탁도는 평균 77.4 NTU, Secchi 투명도는 평균 30.4 cm였다. 물금지역의 6월초 평균 탁도는 10 NTU 이하의 수준이었으나 초기강우로 최대 235 NTU까지 증가했으며, Secchi 투명도 역시 6월초 90 cm에서 초기강우 이후 8 cm까지 감소했다.

하계기간(6~8월) 동안 전기전도도는 251.7 ± 95.1 μ S/cm (범위: 130~440 μ S/cm), 알칼리도는 43.3 ± 13.9 mg/l (범위: 26~68 mg/l)를 나타냈다(Fig. 3E, F). 전기전도도와 알칼리도는 6월 25일 장마 초기강우 직후 급격히 낮아졌고 8월말 이후 서서히 회복되는 양상을 보였

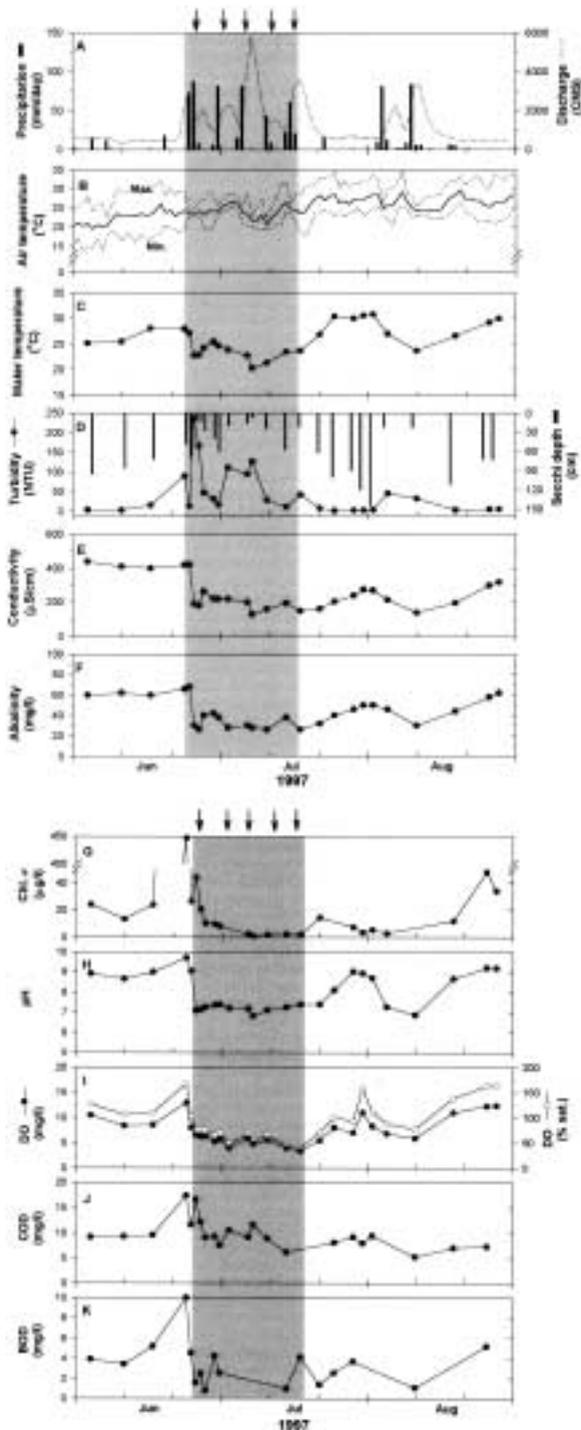


Fig. 3. Changes of meteorological and limnological parameters during the summer of 1997 (Arrows indicate major rainfall events).

다. 전기전도도는 장마 이전 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상의 값을 유지했으나 장마기간동안 평균 218.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 감소하였다.

알칼리도는 60 mg/l 이상이었으나 장마기간동안 평균 35.8 mg/l로 감소했다.

pH는 하계기간 동안 8.0 ± 0.9 (범위: 6.8~9.2), 용존산소는 7.5 ± 5.7 mg/l (범위: 3.4~13.0 mg/l)의 값을 나타내었다 (Fig. 3H, I). pH와 용존산소도 역시 장마기간 동안 각각 평균 7.35, 5.7 mg/l의 낮은 농도를 보이다가 7월 하순부터 평균 수준으로 회복되었다.

BOD와 COD는 하계 기간동안 각각 9.7 ± 2.9 mg/l (범위: 1.0~10.0 mgO₂/l), 3.4 ± 2.2 mg/l (범위: 6.2~17.4 mg/l)의 수준이었다 (Fig. 3J, K). BOD는 6월 초에서 장마 직전까지 3.4~10.0 mg/l 수준이었으나 초기강우로 급격히 감소하여 1.0 mg/l까지 낮아졌고, 장마 종료 후 8월까지 1~5 mg/l 내외의 변화폭을 나타내었다. COD는 6월 초에서 중순까지 10.0 mg/l 수준에서 장마직전 6월 24일 17.4 mg/l까지 증가했으나 초기강우 이후 10.0 mg/l 이하로 낮아졌다.

일반적으로 홍수기에 강에서 가장 두드러진 변화를 보이는 수질항목은 TSS이다 (Meybeck, 1992). 특히, 홍수기의 유량은 SS의 농도 증가에 크게 기여하며 또한 이는 이어지는 강우의 양상과도 밀접한 관계를 가지고 있다 (Walling and Webb, 1992). 홍수로 인한 TSS 양이 증가하는 기간은 작은 하천에서는 몇 시간에서 메콩강과 같이 큰 강에서는 몇 주 또는 몇 달의 범위를 가진다 (Likens *et al.*, 1977; Carbonnel and Meybeck, 1975). 낙동강 하류의 경우 여름기간 탁도가 높은 기간은 식물플랑크톤이 크게 번성한 기간을 제외하면 장마 지속기간과 거의 일치하였다.

2) 영양염류 농도

영양염류 (TN, TP, NO₃-N, NH₄-N, PO₄-P, SiO₂) 농도의 변화는 장마 초기강우를 전후해서 큰 변동을 보였으며, 장마기간에 높은 농도를 보인 경우와 초기강우 이후 급격한 증가를 보였다가 수 일 내에 회복되는 경우로 크게 구분되었다 (Fig. 4). NO₃-N을 제외한 영양염류들은 장마 초기강우 이후 2~3일 사이 2~10배 정도 증가한 것으로 나타났다. 후속 강우로 TP, NH₄-N, SiO₂는 다시 증가하는 양상을 보였다.

TN은 6월 24일 이전 평균 3.2 mg/l였으나 6월 25일 장마 초기강우 직후 6.2 mg/l를 정점으로 서서히 감소하다가 장마가 끝난 7월 17일 이후에 평균 3.6 mg/l의 농도를 나타내었다. NH₄-N은 6월 24일 이전 평균 0.08 mg/l 수준이었으나 장마 초기강우 직후 0.4 mg/l까지 증가하였다가 장마가 끝나면서 평균 0.14 mg/l의 농도를 보였다. TN과 NH₄-N은 장마기간 동안 뚜렷한 증가를

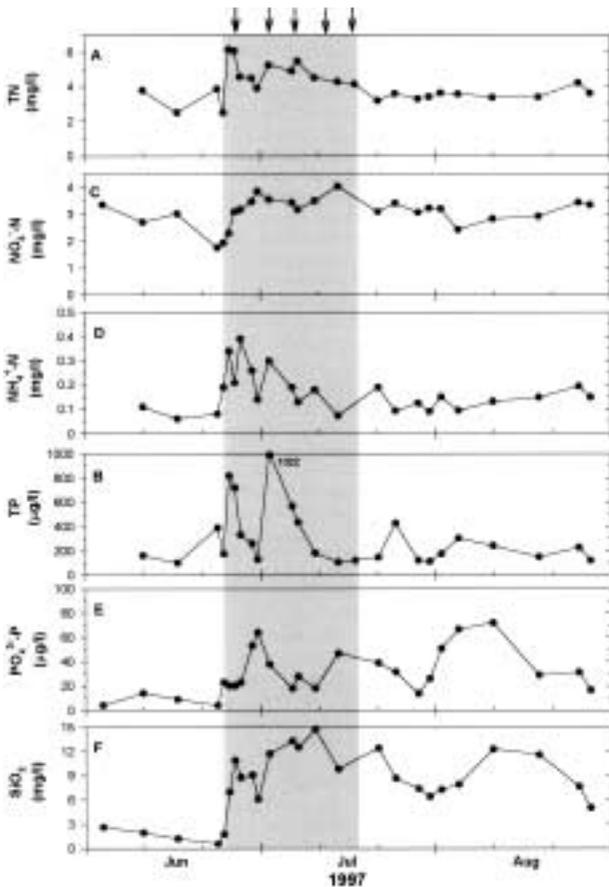


Fig. 4. Changes of nutrient concentrations during the summer of 1997.

했고 장마가 끝난 이후에는 장마 전 수준으로 회복되었다. NO₃-N은 장마직전에 농도가 1.8 mg/l 수준으로 낮았으나 장마 초기강우와 동시에 증가하여 장마기간 동안 3.5±0.3 mg/l 수준을 유지하였고 이후에도 비슷한 농도를 유지하였다.

TP와 PO₄-P의 농도는 장마 초기강우의 영향으로 약 4~5배 증가하였다. TP의 경우 6월 26일 장마 초기강우와 7월 3일 후속 강우에 각각 817, 1,022 µg/l로 높은 농도를 나타냈고, PO₄-P의 농도증가는 TP보다 4, 5일 지체되어 증가가 나타났으며 8월초 집중호우 시에 약 80 µg/l로 하계기간 최고 값을 보였다.

SiO₂는 영양염류 중에서 강우에 의한 변화가 가장 뚜렷한 항목으로 장마 이전에 1.6±0.9 mg/l의 농도에서 장마 초기강우 직후 크게 증가하여 장마기간 동안 9.6±3.7 mg/l의 농도를 나타냈고 8월말까지 꾸준히 높은 농도(8.7±2.6 mg/l)를 유지했다.

수계의 이온 및 영양염 농도에 유량은 큰 영향을 미

치며 유출과 수체의 화학적 특성간의 관계는 집중강우에 의해 집수역에서 유출이 발생할 경우 명확하게 관측할 수 있다 (Miller and Drever, 1997; Cornish, 1982; Muraoka and Hirata, 1988; Jénkins, 1989). Ha (1996)에 의하면 평년에 비해 강우가 빈번했던 1993년의 하계기간 동안 낙동강 하류의 용존 SiO₂ 농도는 6~11 mg/l 정도로 다른 기간에 비해 높게 나타났는데, 이는 상대적으로 규조류 번식이 활발하지 않은 하계기간 동안이 강우의 빈도와 강도에 의해 용존 SiO₂ 동태가 크게 좌우되는 양상을 잘 보여주고 있다. 낙동강 하류와 같이 수괴의 정체가 큰 조절하천에서는 홍수기 및 갈수기가 교차하면서 SiO₂ 농도의 변화 폭이 상당히 큼을 알 수 있었다. 여름기간 강우가 빈번했던 1993년의 경우 낙동강 물금지역의 용존 SiO₂는 7, 8월에 평균 7.4 mg/l 수준으로 높았고(주, 1995), Ha (1996)에 의하면 1993년부터 1995년까지 용존 SiO₂ 농도는 0.0~9.0 mg/l 내외로 변화의 폭이 컸으며 규조 번성기(chl. a. >60~100 µg/l)에는 특히 낮은 농도(0.0~1.0 mg/l)를 보였다. 즉 낙동강 하류역에서는 갈수기에 생물적 요인에 의해 호수에서나 관찰할 수 있는 용존 SiO₂ 변화양상을 보이는 반면, 홍수기에는 농도가 급증하여 전체적으로 조절강에서의 용존 SiO₂ 농도 변화는 매우 역동적인 것으로 평가된다.

3) 식물플랑크톤의 엽록소-a 농도 변화

장마 전후의 식물플랑크톤 엽록소-a 농도 변화는 매우 컸다. 식물플랑크톤은 남조류의 번성으로 인해 장마 시작 직전까지 급격한 증가를 보였으나 장마 시작과 동시에 큰 폭으로 감소하여 8월 중순까지 엽록소-a 농도는 10.3±11.2 µg/l로 낮은 값을 보였다(Fig. 3G). 엽록소-a 농도는 6월 초순 20 µg/l 내외의 수준이었으나 일조량 증가와 수체의 정체로 장마 직전인 6월 24일에 447 µg/l로 약 10 여일 동안 급격한 증가를 보였다. 장마가 시작된 6월 25일 이후 식물플랑크톤의 엽록소-a 농도는 급격히 감소하여 초기강우 직후 6월 28일에는 엽록소-a 농도가 10.5 µg/l 를 나타내었고 이후 장마가 종료된 7월 중순까지 10 µg/l 이하의 값을 보였다. 7월 중순 이후 약간의 농도 증가를 보이나 8월의 집중호우로 인해 8월 중순까지 계속 낮은 농도를 유지했다. 식물플랑크톤 생체량은 8월 중순 이후부터 서서히 증가하여 8월 하순에 엽록소-a 농도가 50 µg/l 수준을 회복했다.

장마기의 집중강우는 하계 조류 생체량의 분포를 결정하는 것으로 보인다. 유수 생태계에 서식하는 동·식물플랑크톤은 홍수와 같은 외부기원의 교란에 의하여 큰 영향을 받는다(Reynolds, 1992). Ha et al. (1999)는 하

계 낙동강 하류에서 발생하는 남조류의 과다번성이 유량과 영양염의 변이와 큰 관계가 있음을 보였다. 1997년의 경우 물금지역에서 장마직전까지 번성한 식물플랑크톤은 남조류인 *Microcystis* sp.로 전체 생체량의 90% 이상을 차지하였으며, 이러한 현상은 하계의 장마에 의하여 크게 변화하였다고 보고하였다. 특히 동아시아권의 몬순기후대에 속한 지역에서는 이 기후에 의하여 호수의 식물플랑크톤 동태가 결정되는 것으로 알려져 있다. Zafar (1986), Lohman *et al.* (1988), Khondker and Kabir (1995)는 몬순 기후에 의해 발생하는 지속적인 강우가 식물플랑크톤의 일차생산력 및 동태에 큰 영향을 미치는 것으로 보고하였으며, Silva and Davies (1987)은 몬순 기간동안 변화한 일사량이 일차생산력 감소에 중요한 요소로 작용한다고 하였다. 이러한 현상은 Recknagel (1997)이 제시한 인공신경망 모형에서도 보여주며, 높은 탁도에 의한 빛 조건의 감소가 남조류의 종조성 변화를 유도할 수 있음을 보였다. 낙동강 하류역에서는 장마의 영향으로 일부 일사량 감소로 인한 일차생산력의 감소 효과도 있겠으나 강우로 증가한 유량에 의하여 유속이 증가, 체류시간의 감소 등이 하류역의 조류생체량 감소에 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

장마 강우가 발생하는 시기는 낙동강 하류 남조 대번성기와 겹치며, 남조의 초기 대번성에 영향을 미친다. 본 연구에서 6월에 발생하기 시작한 *Microcystis*의 번성은 장마기에는 관측되지 않았다. 남조의 우점은 다양한 요인(수온, N:P 비율, CO₂에 대한 친화성, 포식압에 대한 저항성 등)에 의해 결정되는데 (Shapiro, 1990), 장마로 인한 빠른 유속과 수질변화로 인하여 남조발생이 억제되었다. Ha *et al.* (1998)은 장마 이후 태풍이 오는 시기와 맞물려 남조 대번성이 연간 변이를 보임을 보고하였다. 즉 장마와 같은 기상 현상이 조절장 생태계에서 식물플랑크톤 동태에 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 즉 강우에 의해 하천의 물리적 성향이 변할 경우 다양한 경로를 통하여 수질에 큰 영향을 미치게 되며, 특히 갈수 기간 이후의 첫 집중강우로서 장마는 중요한 위치를 차지한다.

3. 장마 초기강우 전후기간의 수질변화

장마 기간 중 강우의 영향으로 수체의 이화학적 변동이 가장 컸던 기간은 6월 25일에서 27일 사이였으며 집수역의 평균 강우량은 전체 장마기간 총 강우량의 약 35%에 해당하는 187 mm였다 (Fig. 5A). 자동 측정장치로 연속 측정된 항목을 토대로 초기강우의 낙동강 본류

수질에 대한 영향은 최초 강우 시작 후 약 24시간 정도 지연되어 나타났다. 수문학적으로 잘 알려진 바와 같이 유량 및 수위의 증가는 강우의 양상과 유하거리, 하천의 형태, 집수역의 토질, 지형, 하상의 장애물 등에 의해 크게 좌우된다 (Burt, 1992; An, 2000c). 낙동강 하류에서도 이와 같은 요인들에 의해 유량증가와 수위상승이 영향을 받을 것으로 사료된다. 조사지점의 수위는 6월 26일부터 증가하기 시작하여 초기강우 기간 중 최고 2.2 m를 기록하여 1.2 m 정도 증가하였으며 강우가 다소 소강상태에 접어들면서 주기성을 보이며 감소하였다 (Fig. 5B).

수온은 25일까지 일주기를 보이면서 26°C 이상을 기록하였지만, 강우에 의해 약 20°C까지 급격히 낮아졌다가 초기강우 이후 서서히 회복되었다 (Fig. 5C). 전기전도도의 변화는 강우가 시작된 초기에는 오히려 30 μ S/cm 정도 증가하였고 이후 큰 폭의 감소를 보였는데 그 변화정도는 430 μ S/cm에서 6시간만에 120 μ S/cm으로 낮아져 약 1/3 수준으로 낮아졌다 (Fig. 5D). DO %포화도는 강우직전까지 80~150%로 큰 일교차를 보였으나 6월 24일부터 복상한 장마전선에 의하여 일사량이 감소하여 DO %포화도가 감소하기 시작했다 (Fig. 5E). pH와 알칼리도는 서로 유사한 양상을 보이며 감소하였다 (Fig. 5F). 강우 직전까지 높은 값을 기록하였으나 (pH, 9.06; 알칼리도, 68 mg/l), 수위가 증가하면서 동시에 낮아지기 시작하였다. 탁도는 6월 24일 90 NTU에서 25일 강우가 시작되면서 14 NTU로 낮아졌고 26일 유량증가와 함께 235 NTU로 급격하게 상승하였다 (Fig. 5G). 장마 초기강우가 시작되기 전인 6월 24일의 탁도가 90 NTU로 높았는데 이는 급격히 증가한 식물플랑크톤 (chl. a, 447 μ g/l)으로 판단되며, Secchi 투명도는 48 cm였다.

용존 SiO₂는 장마가 시작되기 전 6월에 1.6 \pm 0.9 mg/l 정도로 낮은 수준이었으나 강우와 동시에 증가하여 6월 27일 최고 10.9 mg/l의 값을 보였다 (Fig. 5G). TN은 장마 초기강우 전 3.8 mg/l에서 초기강우 이후 6.1 mg/l로 약 2배 정도 높아져 초기강우가 지속된 27일까지 유지되다가 감소했다 (Fig. 5H). TP의 경우도 TN과 유사하여 강우전 391 μ g/l에서 이후 817 μ g/l로 장마 초기강우 직전의 약 2배 정도 증가를 보였다 (Fig. 5I).

식물플랑크톤 생체량은 장마 초기강우가 시작되면서부터 큰 폭의 감소를 보였는데 6월 24일 엽록소 a의 농도가 447 μ g/l에서 25일 26 μ g/l로 크게 감소하여 장마 종료시까지 낮은 생체량이 유지되었다 (Fig. 5J).

상류에 많은 댐을 가진 조절 하천 (regulated river)에서의 유량 및 수위의 변화는 댐건설 전에 비해 홍수기

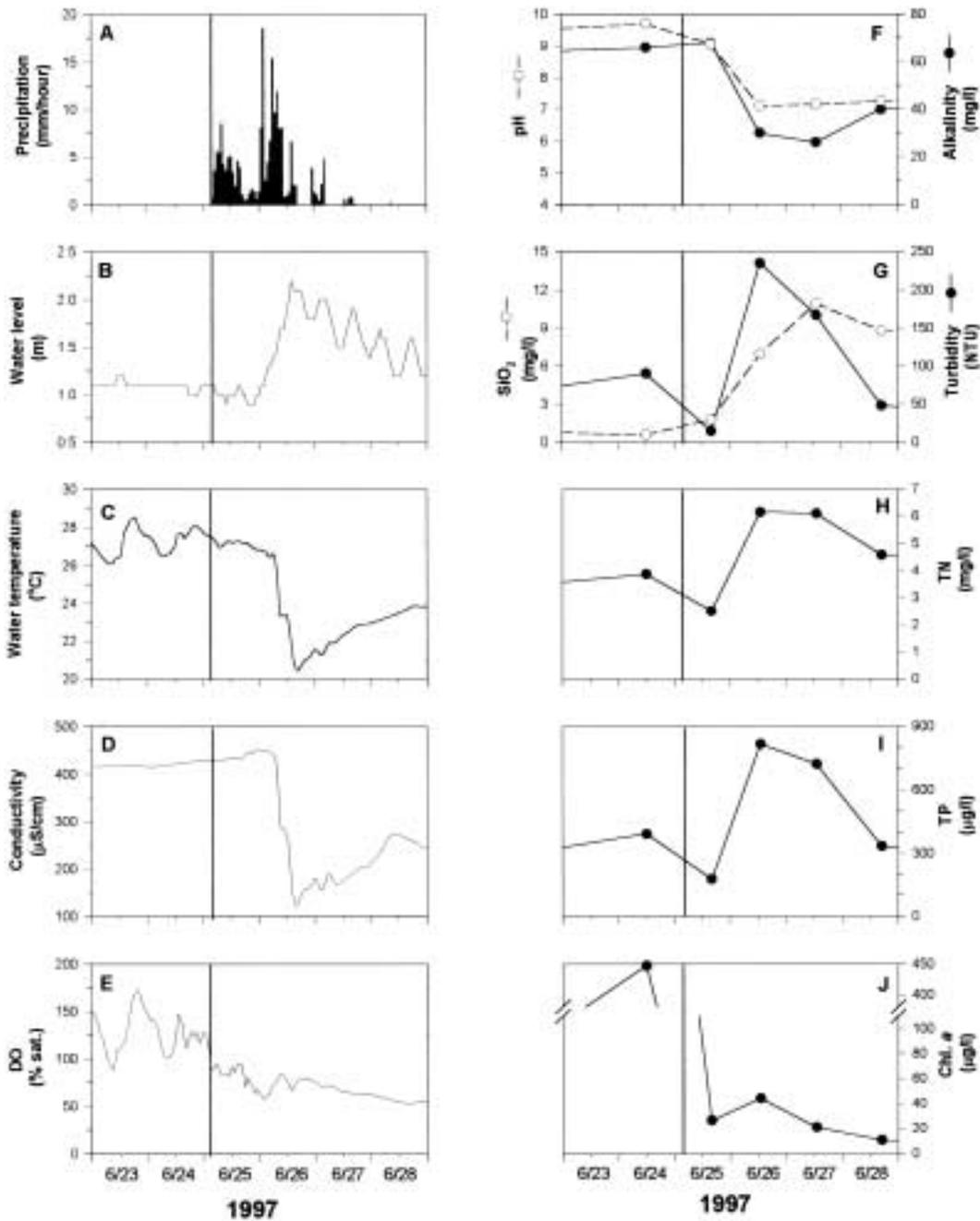


Fig. 5. Hydrological influences on the water quality, based on intensive monitoring during the first concentrated rainfall event (6/23~28, 1997).

최대 유출량은 크게 감소하고 갈수기에도 안정적인 유량이 유지되는 형태로 유량변화양상이 변하여 댐의 방류량 및 용수수요가 하류의 유량에 직접적인 영향을 미치고 있다 (Ebel *et al.*, 1989). 낙동강의 경우 여름철의 집중호우로 증가한 중·상류댐의 수위는 6~7개월간의 갈수기동안 낮아진 상태이며 일부는 장마기간 저수를 위

해 장마 전에 미리 방류를 하기도 한다. 그 결과 상류지역에서는 장마 초기강우를 포함한 상당량의 강우량이 댐의 저수량으로 일차적으로 전환되기도 한다. 또한 수개월동안 건조해진 집수역의 토양에 흡수되므로 낙동강 본류의 유량변화에 장마 초기의 강우가 일부만이 반영되는 것으로 사료된다.

1997년 장마 초기강우로 유역내 주요지점(안동, 대구, 밀양, 진주, 합천)에서 평균 170 mm의 강우가 있었으나 실제 물금의 수위변화는 1 m 내외로 그 영향이 적었다. 7월 5일~6일, 3회째 유역 주요 지점에서 평균 81.6 mm의 강우가 발생하여 물금 수위가 2.1 m 정도 높아져 가장 수위 변화가 컸다. 따라서 상류지역에 댐을 많이 가지거나 유·출입이 조절되는 강에서는 강우의 효과가 인위적인 요인에 의해 영향을 받을 수 있고 이는 이후의 수질 변화에 영향을 줄 수 있다고 사료된다.

갈수 기간 이후의 첫 집중강우는 강의 연간 수질변화 패턴에 중요한 요소로 작용한다. 우리나라의 경우 연중 강우의 분포가 하계에 집중되어 있어 겨울부터 다음해 장마기 전까지는 수량이 부족하다. 또한 건조기간동안 수체의 체류시간이 상당히 증가하게 되며, 장마기의 초기 강우는 이와 같은 상황을 크게 교란하는 요인으로 작용한다. 초기강우 전후 24시간 간격으로 실측한 자료를 종합해보면 6월 25일에서 26일 사이 수질항목 및 영양염류에서도 가장 큰 변화를 보였다. 이 기간 영양염류

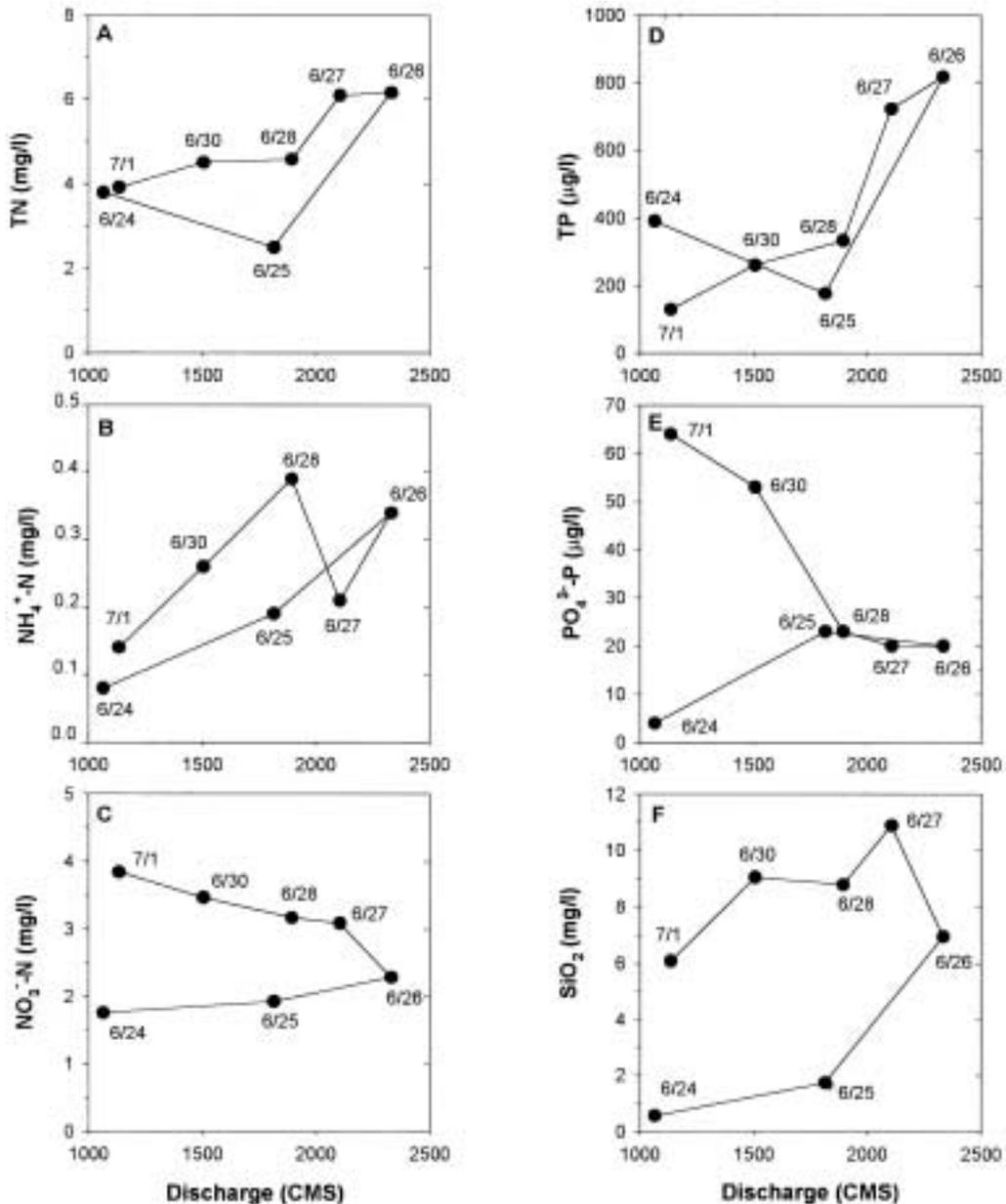


Fig. 6. Daily trajectories of various nutrients in relation to the discharge at the lower part of the river.

의 농도는 크게 증가한 반면 pH, 알칼리도, 엽록소 a 농도 등은 크게 감소했다.

장마기 초기강우는 집수역에 갈수기동안 축적된 육상 기원의 영양물질을 일시에 수계로 유입시키는 결과를 가져와 집수역의 환경 및 수환경 변화에 중요한 요인으로 작용한다. 장마기 이후 1~3차례 발생하는 태풍이 변화된 수질과 플랑크톤 동태가 이전 수준으로 회복되는 데에 크게 영향을 미쳤다. Ha *et al.* (1999)와 Kim *et al.* (2001)은 낙동강 하류에서 식물 및 동물플랑크톤의 군집 구조가 장마기 초기 강우 이후부터 크게 변한다고 보고하였으며, Lee *et al.* (1999)은 낙동강 하류 오염부하량 변화가 하계의 강우와 깊은 관계를 갖고 있음을 보고하였다. 하계 이후 점차적으로 수체가 안정화되면서 수질 및 플랑크톤 군집 구조가 안정성을 되찾으면 이듬해 여름에 발생하는 장마에 의하여 교란을 받는다. 이와 같은 계절성은 동아시아에서 볼 수 있는 특징적인 현상으로, 보다 세부적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

4. 장마 초기강우 기간 영양염류의 농도변화 패턴

초기강우 기간(6/24~7/1)동안의 영양염류별 농도변화와 유량(삼랑진)과의 관계를 보면, 강우가 진행되면서 농도가 지속적으로 증가한 항목과 강우전 수준을 회복하는 항목으로 나눌 수 있었다 (Fig. 6). TN, TP, NH₄⁺-N의 농도는 6월 25일 장마 초기강우가 시작되면서 유량증가와 동시에 농도가 큰 폭으로 증가했다가 26일 이후 유량이 감소하면서 서서히 감소해 7월 1일에는 거의 장마전 처음 수준으로 돌아왔다 (Fig. 6A, B, D). 반면, PO₄-P 농도는 급격한 유량증가에도 농도는 큰 변화를 보이지 않다가 유량이 감소하면서 농도가 증가하였다 (Fig. 6E). NO₃-N 농도는 유량이 증가하면서 농도도 다소 증가했고 유량이 감소하는 26일 이후에도 농도는 지속적으로 증가했다 (Fig. 6C). 용존 SiO₂ 농도는 장마 초기강우 직전까지 낮은 수준이었으나 초기강우 시작과 동시에 크게 증가하였고 26일 유량 감소에도 농도는 다소 증가해 일정수준 이상의 높은 농도를 장마기간 내내 유지하였다.

Meybeck 등(1996)은 홍수나 집중호우시 유량의 변화에 따른 각 수질항목의 농도변화 추이를 크게 몇 개의 유형으로 구분하였다. 유량증가에 따라 농도가 증가하는 항목은 유기물질, 질소계열 영양염, 총부유물질, DOC 등이며 감소하는 항목은 주요 양이온(Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ 등)과 SiO₂ 등이다. 또한 루프(loop)형으로 순환하는 항목, 즉 증가하였다가 유량감소로 원래대로 복귀하는

유형과 유량에 관계없이 강우이후에도 일정하게 농도가 유지되고 있는 유형이 있었다. 낙동강 하류에서의 유량 변화에 따른 수질항목의 농도는 Meybeck 등(1996)이 제시한 4가지 유형에 비교적 일치하나 용존 SiO₂ 농도의 경우 강우로 인해 토사에 포함된 용존 규소가 용출되어 농도가 증가하는 경향을 나타내었다.

적 요

본 연구는 낙동강 하류에서 장마 기간의 강우가 수질 변화에 미치는 영향을 평가하였다. 1997년 하절기 장마 기간 주요 집수역의 강우상황을 분석하고 낙동강 하류역(물금)에서 1~3일 간격으로 수질항목(수소이온농도, 탁도, 투명도, 엽록소-a, 용존산소, 전기전도도, 수온)과 영양염류 등(총질소, 총인, 질산성 질소, 암모니아성 질소, 인산 인, 규산)을 측정하였다. 또한 갈수기 이후 큰 강에서 최초 집중강우가 수질 변화에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수질 자동측정장비 (Hydrolab Recorder™)를 이용하여 장마 초기강우 전후에 1시간 간격으로 수질 및 수위변화를 모니터링하였다. 우리나라는 연간 강우의 약 50% 이상이 하절기(6~8월)에 집중되며, 특히 장마는 6월 하순경에 시작하여 7월 중순까지 약 한 달간 하천 수환경에 크게 영향을 미친다. 1997년 장마기간동안 낙동강의 주요 집수역에서 50 mm 이상의 강우가 내린 횟수는 총 5회였고, 여름기간 중 물금 지역에서 물리·화학적 환경요인에 급격한 변화가 일어난 시기는 장마 초기를 전후해서였다. 초기강우로 기초수질항목 중 수온, 수소이온농도, 전기전도도, 용존산소는 큰 폭으로 감소하였고 탁도, 영양염류 및 규산 등과 같은 항목은 증가하는 양상을 보였다. 하절기 엽록소-a 농도는 총인, 총질소의 높은 농도에도 불구하고 연중 최저치를 나타냈는데, 이는 장마 강우로 인한 탁도 증가와 수체의 체류시간 감소 영향 등이 크게 작용한 것으로 사료된다. 장마 초기 강우 동안 영양염류의 농도는 크게 증가하는 양상을 보였으나 항목에 따라 그 패턴은 다소 상이했다. 장마는 몬순기후에 의해 발생하는 기상 현상으로, 연중 가장 두드러진 집중된 강우 및 급격한 유량변화를 유발함으로써 하천생태계에 큰 영향을 미치게 된다. 특히, 이 기간 동안 강우의 빈도 및 강도는 하천의 육수학적 현상 변화와 패턴에 중요한 요소로서 작용하며, 이는 동아시아 몬순기후대에 속하는 하천들에서 유사하게 발생하는 하천의 중요한 특성으로 사료된다.

사 사

본 연구는 부산대학교 환경기술·산업개발 연구소의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: R12-1996-015-00035-0). 본 연구를 수행하는 동안 많은 도움을 주신 최상호, 주윤희에게 감사 드립니다. 이 논문은 부산대학교 육수학연구실 낙동강 생태연구 논문 제27호입니다.

참 고 문 헌

- 기상청. 1991. 한국기후표 · 기후예년값. 기상청. 서울.
- 기상청. 1995. 기상년감. 기상청. 서울.
- 김범철, 허우명, 황길순, 김동섭, 최광순. 1995. 소양호에서 인의 존재 형태별 분포에 관하여. 한국육수학회지. **28**: 151-157
- 박성배. 1998. 낙동강 중·하류의 기초수질과 장마기 초기강우가 수질에 미치는 영향. 부산대학교 석사학위논문. 104 pp.
- 윤용남. 1998. 공업수문학. 청문각. 서울.
- 주기재. 1995. 낙동강생태연구(1957-1994). 도서출판 금정. 부산.
- An, K.G. 2000a. Dynamic changes of dissolved oxygen during summer monsoon. *Kor. J. Limnol.* **33**: 213-221.
- An, K.G. 2000b. Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus. *Kor. J. Limnol.* **33**: 222-229.
- An, K.G. 2000c. The impact of monsoon on seasonal variability of basin morphology and hydrology. *Kor. J. Limnol.* **33**: 342-349.
- Burt, T.P. 1992. The hydrology of headwater catchments. in: P. Calow and G.E. Petts (eds.), *The River Handbook: Hydrological and Ecological Principles*. Vol. 1. Blackwell Scientific Publication. Oxford. pp. 3-28.
- Carbonnel, J.P. and M. Meybeck. 1975. Quality variations of Mekong River at Pnom Penh, Cambodia, and chemical transport in the Mekong Basin. *J. Hydrol.* **27**: 249-265.
- Cornish, P.M. 1982. The variations of dissolved ion concentration with discharge in some New South Wales streams. in: O'Loughlin, E.M. and L.J. Bren (eds.) *The First National Symposium on Forest Hydrology*, Melbourne, pp. 67-71.
- Ebel, W.J., C.D. Becker, J.W. Mullan and H.L. Raymond. 1989. The Columbia River-toward a holistic understanding. in: Dodge, D.P. (ed), *Proceedings of the International Large Rivers Symposium*, Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 106. Department of Fish and Oceans. Ottawa.
- Ha, K. 1996. The Mechanism of Phytoplankton Succession in the Lower Part of Nakdong River. M.S. thesis, Pusan National Univ., 86 pp.
- Ha, K., E.A. Cho, H.W. Kim and G.J. Joo. 1999. *Microcystis* bloom formation in the lower Nakdong River, South Korea: importance of hydrodynamics and nutrient loading. *Mar. Freshwater Res.* **50**: 89-94.
- Ha, K., H.W. Kim and G.J. Joo. 1998. The phytoplankton succession in the lower part of hypertrophic Nakdong River (Mulgum), South Korea. *Hydrobiologia* **369/370**: 217-227.
- Jenkins, A. 1989. Storm period hydrochemical response in an unforested Scottish catchment. *Hydrolog. Sci. J.* **34**: 393-404.
- Joo, G.J., H.W. Kim, K. Ha and J.K. Kim. 1997. Long-term trend of the eutrophication of the lower Nakdong River. *Kor. J. Limnol.* **30**: 472-480.
- Khondker, M. and A. Kabir. 1995. Phytoplankton primary production in a mesotrophic pond in sub-tropical Bangladesh. *Hydrobiologia* **304**: 39-47.
- Kim, B.C., K.S. Choi, C.G. Kim, U.H. Lee and Y.H. Kim. 2000. Effect of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, Lake Soyang, Korea. *Water Res.* **43**: 3495-3504.
- Kim, H.W., G.J. Joo and N. Walz. 2001. Zooplankton dynamics in the hyper-eutrophic Nakdong River system (Korea) regulated by an estuary dam and side channels. *Internat. Rev. Hydrobiol.* **86**: 127-143.
- Kim, H.W., K. Ha and G.J. Joo. 1998. Eutrophication of the lower Nakdong River after the construction of an estuarine dam in 1987. *Internat. Rev. Hydrobiol.* **83**: 65-72.
- Lee, S.K., S.H. Choi, H.W. Kim, K. Ha and G.J. Joo. 1999. Inter-annual variability of nutrient loadings in the lower Nakdong River, Mulgum, Korea. *Acta Hydrobiol. Sinica* **23**: 17-23.
- Likens, G.E., F.H. Borman, R.S. Pierce, J.S. Eaton and N.M. Johnson, 1977. *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. Springer-Verlag., New York.
- Lohman, K., J.R. Jones, M.F. Knowlton, B.D. Swar, M.A. Pamperl and B.J. Brazos. 1988. Pre- and postmonsoon limnological characteristics of lakes in the Pokhara and Kathmandu valleys, Nepal. *Verh. Int. Ver. Limnol.* **23**: 558-565.
- Meybeck, M., G. Friedrich, R. Thomas and D. Chapman. 1992. Rivers. in: Chapman, D. (ed), *Water Quality Assessments*. Chapman and Hall, London.
- Miller, W.R. and J.I. Drever. 1997. Water chemistry of a

- stream following a storm, Absaroka Mountains, Wyoming. *Geol. Soc. Am. Bull.* **88**: 286–290.
- Muraoka, K. and T. Hirata. 1988. Streamwater chemistry during rainfall events in a forested basin. *J. Hydrol.* **102**: 235–253.
- Pringle, C.M., R.J. Naiman, G. Bretschko, J.R. Karr, M.W. Oswood, J.R. Webster, R.L. Welcomme and M.J. Winterbourn. 1988. Patch dynamics in lotic systems. *J. N. Am. Benthol. Soc.* **7**: 503–524.
- Recknagel, F. 1997. ANNA–Artificial Neural Network model for predicting species abundance and succession of blue–green algae. *Hydrobiologia* **349**: 47–55.
- Reynolds, C.S. 1992. Algae. in: Calow, P. and G.E. Petts (eds), *The River Handbook: Hydrological and Ecological Principles*. Vol. 1. Blackwell Scientific Publication, Oxford.
- S.H.G.N. 1990. *Annuaire Hydrologique de la Suisse*. Service hydrologique et geologique national, Office fed. environment. Forets et Paysages, Berne.
- Shapiro, J. 1990. Current beliefs regarding dominance by blue–greens: the case for the importance of CO₂ and pH. *Verh. Int. Verein. Limnol.* **24**: 38–54.
- Silva, E.I.L. and R.W. Davies. 1987. The seasonality of monsoonal primary productivity in Sri Lanka. *Hydrobiologia* **150**: 165–175.
- Walling, D.E. and B.W. Webb. 1992. Water quality: I. physical characteristics. in: Calow, P. and G.E. Petts *The River Handbook: Hydrological and Ecological Principles*. Vol. 1. Blackwell Scientific Publication, Oxford.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 1991. *Limnological Analyses*. 2nd Ed. Springer–Verlag, New York.
- Zafar, A.R. 1986. Seasonality of phytoplankton in some South Indian lakes. *Hydrobiologia* **138**: 177–187.

(Received 10 July 2002, Manuscript accepted 25 Aug. 2002)