

탁수가 어류군집에 미치는 영향: 대기천 및 봉산천의 사례연구

김재구² · 최재석* · 장영수² · 이광열¹ · 김범철²

(강원대학교 환경연구소, ¹생물학과, ²환경학과)

Effects of Turbid Water on Fish Community: Case Studies of the Daegi Stream and the Bongsan Stream. Kim, Jai-Ku², Jaeseok Choi*, Youngsu Jang², Kwangyeol Lee¹ and Bomchul Kim² (Institute of Environmental Research; ¹Department of Biology; ²Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

The effects of turbid water on fish community was investigated in a clear reference stream (the Bongsan Steam) and a turbid stream (the Daegi Stream) located in the upstream region of the South Han River, Korea. The stress index (SI) of suspended solids (SS) were calculated during a rain event concentration by the equation $SI=LN(SS \times duration)$. EMC of SS was 1~13 mg L⁻¹ in the clear stream with a mean SI of 5.2, while SS was 97~1,150 mg L⁻¹ in the turbid stream with a mean SI of 10.3. Even though the number of species was not much different, the dominant species of the two steams were distinctly different. The reference stream was dominated by upstream species such as *Rhynchocypris kumgangensis*, *Brachymystax lenok tsinlingensis*, and *Cottus poecilopus* which are typical upstream community. Whereas the turbid streams was dominated by *Rhynchocypris kumgangensis*, *Zacco koreanus*, and *Orthrias nudus* which are representatives of middle reache community. Fish density was four times higher in the clear steam than the turbid stream. In the similarity analysis of fish communities the community of the turbid stream showed large dissimilarity with other communities in other streams of similar size. In conclusion, although turbidity might be at the sublethal concentration, fish communities are under stress in some turbid streams of Korea that is strong enough to induce community change. It can be an example of a chronic ecological toxicity of turbidity at the community level.

Key words : chronic ecological toxicity, fish community, stress index, turbid water

서 론

우리나라 몬순기후 특성은 하천생태계의 구조 및 기능에 복합적인 영향을 줄 가능성이 있는 것으로 알려져 있다. 최근 한강 상류에서 강우의 강도 및 강우량이 증가하

면서 유역으로부터 발생된 대량의 토사가 유입되고 있어 탁수 오염문제는 심각한 오염원으로 부각되고 있다. 특히 강우시 발생하는 고탁수 부유물질은 플랑크톤의 발생 및 부착성 어란의 폐사와 부화 자어의 서식환경을 악화시켜 결국에는 하천 생태계 전반에 커다란 변화를 초래한다 (홍 등, 2004).

* Corresponding author: Tel: 033) 250-8405, Fax: 033) 251-3990, E-mail: gobiobotia@hanmail.net

탁수의 강도에 따라 어류는 질식사 및 찰과상 유발 (Chapman, 1988), 생리적으로 아가미 장애, 삼투조절 방해, 혈당량 증가, 면역능력 감소, 생식력 및 성장률 감소 (Sigler *et al.*, 1984), 그리고 먹이 섭식을 및 반응거리가 감소된다. 또한 토사의 퇴적 증가로 부화율 및 산란지 (Hunter, 1973), 서식지, 피난처 등의 장소를 감소 및 파괴시키는 것으로 알려져 있다 (Noggle, 1978; Reed *et al.*, 1983; Lloyd, 1987; Bash *et al.*, 2001).

미국의 경우 탁수 문제는 수질의 오염원으로서 뿐만 아니라 수 생태계를 파괴하는 요인으로서 다루고 있다. 특히 탁수에 민감한 송어와 연어를 대상으로 생리·생태학적 측면과 서식지 파괴에 따른 군집의 변화상등에 관하여 많은 연구 자료가 축적되어 탁도에 대한 과학적 기준을 설정하는 근거 자료로 활용하고 있다. 예를 들면, 보편적으로 하천의 탁도 기준을 40 NTU 이하로 규정하고 있으며 탁도에 민감한 송어가 서식하는 하천에서는 20 NTU 이하로 강화된 규정을 적용하여 탁수에 의한 수중 생태계 파괴를 저감시키고 있다. 그러나 우리나라의 경우 SS를 25 mg L⁻¹로 규정하고 있어 선진국과 유사한 기준이나 규제의 필요성이 부각되고 있다. 국내에서의 탁수발생에 관련된 연구는 최근 비점오염원의 중요성이 강조되면서 수질에 미치는 영향을 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있지만, 아직까지 생태계에 미치는 영향연구는 거의 이루어지지 않고 있어 수 생태계 보존을 위한 연구가 필요한 실정이다. 생태계 변화를 예측하기 위한 자료는 시간과 공간측면에서 단순하게 단시간에 효과적으로 얻을 수 없으며, 반드시 체계적이고 지속적인 연구를 통한 기초 자료 및 데이터의 축적이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 선행된 탁수영향조사(한강수계관리위원회, 2004)의 연속적인 개념으로 장기적인 탁수의 영향에 따른 어류군집의 변화, 특정 개체군의 성장 등을 모니터링 함으로써 탁수로 인한 하천 내 어류의 피해 실태를 짐작하고, 탁수저감대책 수립 시 기초자료로 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

남한강 상류의 지류로서 유역면적이 비슷한 두 하천을 선정하여 조사하였다. 대기천 (56.54 km²)을 탁수의 영향을 받는 실험구로, 그리고 봉산천 (59.14 km²)을 청정하천의 대조군으로 선정하였다. 송천은 강원도 평창군, 강릉시, 정선군 등 산간지역을 흘러 남한강 상류로 유입하는 하천이다. 토지이용도 측면에서, 대기천은 고랭지 채소밭 등으로 인하여 탁수의 영향을 지속적으로 받으며, 봉산천

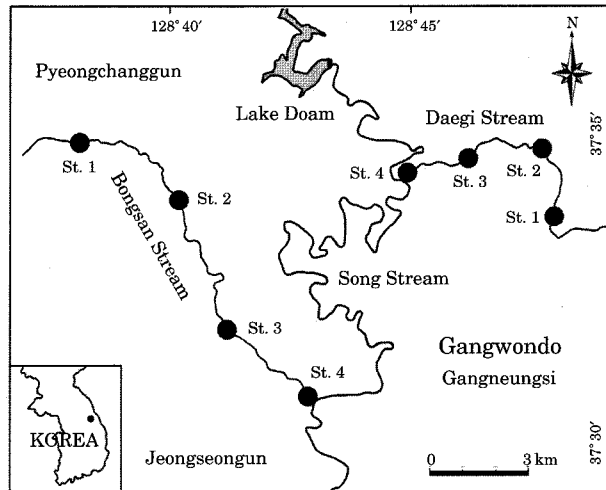


Fig. 1. Map showing the study area.

은 삼림이 우거진 자연형 하천이다 (Fig. 1).

조사는 2004년 5월부터 2005년 8월까지 총 4회에 걸쳐 실시하였는데, 1차 조사는 2004년 5월 17~18일, 2차 조사는 2004년 9월 4~5일, 3차 조사는 2005년 5월 10~11일, 4차 조사는 2005년 8월 24~25일에 실시하였다. 하상의 기질은 Cummins (1962)의 기준에 따라 boulder, cobble, pebble, gravel, sand 등으로 구분하고 각각의 피도를 측정하였다.

하천의 부유물질은 각 하천의 최하류 배수지점을 대상으로 2004년에서 2005년까지 여름 기간 동안 4회 강우사상을 대상으로 조사하였다. 부유물질 농도는 공정시험법에 따라 분석하였으며 유량은 유속계와 유속단면법을 사용하여 측정하였다. 각 하천의 부유물질농도의 대표치는 유량가중 평균농도 (Event Mean Concentration: EMC)를 사용하여 제시하였다. 각 조사지점에서의 EMC는 강우시 일정 시간 간격으로 조사된 유량과 부유물질농도의 곱으로부터 누적부하량을 산정 한 후 누적유량으로 나누어 유량가중평균 농도를 계산하였다.

강우 시 하천의 부유물질로 인한 Stress Index (SI)는 발생한 탁수의 EMC에 탁수지속기간을 곱하여 자연로그를 취해서 계산하였다 (Newcombe and MacDonald, 1991).

$$\text{Stress Index (SI)} = \ln [\text{EMC (SS mg L}^{-1}) \times \text{탁수지속기간 (Hr)}]$$

어류표본의 채집은 각 조사 지점에서 투망(망목 7×7 mm), 족대(망목 4×4 mm)를 사용하였다. 채집한 어류는 채집 즉시 현장에서 10% 포르말린용액으로 고정된 다음 실험실로 운반하여 동정·분류하였고 종별로 체장과 습

중량을 측정하였다. 어류의 동정에는 최 등(1990), 김과 강(1993), 김(1997), Kim *et al.* (2005) 등을 이용하였다. 분류체계는 Nelson(1994)을 따랐다.

어류의 현존량은 Gorman and Karr (1978)의 방법을 변형하여 조사하였다. 조사는 각 지점에서 면적 60 m² 구간을 임의로 설정하고 조사구역 상·하방을 그물로 막은 후, 조사지역 하류의 왼쪽 가장자리에서부터 0.2 m 떨어진 곳에서 하천을 가로질러 1 m 간격으로 실시하였으며 상류로 이동시에는 3 m의 간격을 두고 이동하였다(Fig. 2). 이것을 6회 반복하여 조사하였다.

본 연구에서 조사된 두 지점 이외에 인접한 다른 하천들과 어류군집을 비교하였다. 비교 대상이 된 다른 하천은 유사한 크기를 가진 내린천, 자운천, 자운천 등이다(남 등, 1998; 한강수계관리위원회, 2004). 군집의 유사도지수로서는 두 군집에서 공통으로 출현하는 종 수의 비율을 사용하는 Jaccard의 유사도지수(Jaccard, 1908)를 사용하였으며, 산출된 유사도를 적용하여 군집의 cluster analysis를 실시하였다. 군집의 분류에는 비가중치 평균연결법(UPGMA)을 사용하였다(Mountfold, 1962)

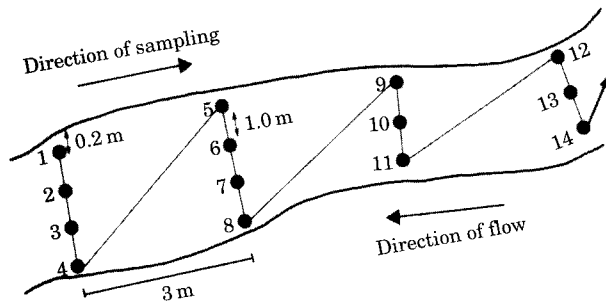


Fig. 2. The method of sampling by Gorman and Karr (1978).

결과 및 고찰

1. 조사지개황 및 하상구조의 특징

대기천과 봉산천은 송천의 지류로서 위치도 비슷할 뿐 아니라 유역면적(56.54 km², 59.14 km²)도 비슷하여 서로 간의 비교하천으로는 매우 좋은 하천이라 할 수 있다. 대기천 유역의 상당 부분이 고랭지 채소밭으로 이루어져 있으며, 주변에는 부분적으로 민가와 도로 등이 위치하고 있었다. 봉산천은 대기천과 반대로 대부분의 지역이 울창한 숲으로 하천을 덮은 전형적인 자연형 하천의 특징을 보여 주고 있었다.

한편 조사하천의 하폭, 수심, 하상구조 및 유속 등의 물리적 서식환경을 조사한 결과는 다음과 같다(Table 1). 봉산천과 대기천의 하폭은 모두 비슷하게 나타났고, 수심의 경우 봉산천은 0.1~1.8 m, 대기천은 0.1~1.0 m로 나타나 대기천의 수심이 봉산천보다 낮게 나타났다. 이는 대기천 주변 고랭지농경지 및 소하천 공사 등으로부터 토사의 유입 즉, 하천 내 모래가 쌓임으로 인하여 하천의 깊이가 낮아진 것으로 판단된다. 특히 하상구조의 경우 봉산천에서는 대부분이 큰돌 또는 작은돌로 이루어져 전형적인 산간계류의 하천 바닥상태를 보여주나 대기천에서는 대부분이 모래나 잔자갈로 이루어져 있었다. 따라서 큰돌과 작은돌의 틈이 모래나 잔자갈로 메워져 있음을 육안으로 확인할 수 있었다.

2. 유역의 토지 이용 및 탁수 발생 현황

대기천은 상류유역에 대규모의 고랭지채소밭 단지가 위치하고 있어 경작지의 비율이 높은 반면 맑은 하천인 봉산천의 경우 유역 내 삼림피복도가 90% 이상을 차지

Table 1. Substrate conditions of stream bed in the two study streams.

Stream	Sites	Items			
		Stream bed *(B:C:P:G:S)	Stream width (m)	Water depth (m)	Water current
Turbid stream	1	1:2:2:1:4	8~10	0.1~0.5	Rapid
	2	1:2:2:2:3	10~20	0.1~1.0	"
	3	1:2:1:2:4	30~50	0.1~0.6	"
	4	1:1:2:2:4	20~35	0.1~0.8	"
Control stream	1	4:3:2:1	10~15	0.1~0.6	Rapid
	2	4:2:3:1	10~20	0.1~1.2	"
	3	3:3:3:2	30~40	0.1~1.2	"
	4	2:3:3:1:1	20~35	0.1~1.8	"

*B: Boulder (> 256 mm), C: Cobble (62~256 mm), P: Pebble (16~64 mm), G: Gravel (2~16 mm), S: Sand (0.1~2 mm)

Table 2. Land use in the watersheds of the two study streams.

Stream	Upland	Forest	Others
The Bongsan Stream (clear stream)	0.3 km ² (0.5%)	58.7 km ² (99.2%)	0.2 km ² (0.3%)
The Daegi Stream (turbid stream)	9.2 km ² (17.2%)	39.3 km ² (73.6%)	4.9 km ² (9.2%)

Table 3. EMCs of SS, exposure time, and stress index (SI) during rain events.

Stream	Sampling site	Rainfall (mm)	EMC(SS) (mg L ⁻¹)	Exposure (H)	SI LN [SS*H]
Control stream	3	124	14	41	6.3
	4	20	2	33	4.0
Turbid stream	1	55	1,150	30	10.5
	2	293	628	163	11.5
	3	124	1,005	63	11.1
	4	20	97	33	8.1

하고 있다(Table 2).

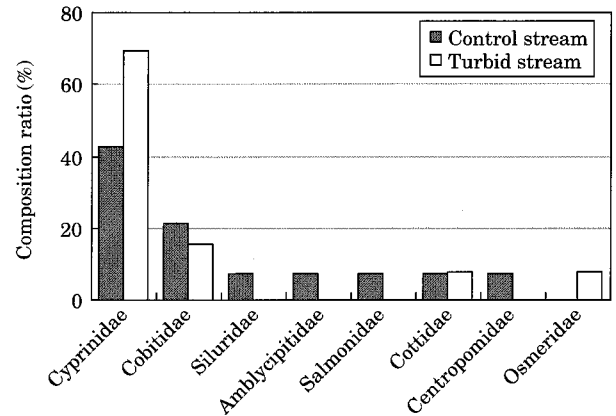
유역 내 서로 다른 토지이용에 따라 강우시 하천들 간의 탁수유출정도는 차이를 보였다. 탁수하천인 대기천의 EMC(SS)는 대조하천인 봉산천에 비해 58~73배(3차, 4차 조사결과) 높았다. 한편 강우량에 따른 단위면적당 SS 유출부하량은 대기천은 봉산천에 비해서 20~200배 정도 높게 나타났다(Table 3).

강우시 발생하는 탁수의 영향에 따른 하천의 Stress index는 탁수하천과 대조하천 간에 뚜렷한 차이를 보였다. EMC(SS)와 탁수노출시간에 따라 계산된 서식지의 Stress index는 탁수하천인 대기천의 중앙값이 10.37 정도였으며, 반면 대조 하천인 봉산천의 SI(중앙값)은 5.94 정도로써 매우 낮았다(Table 3). 이는 탁수하천에서 받는 서식지 스트레스가 약 84배 정도 크다는 것을 의미한다.

3. 어류

1) 어류상 비교·분석

탁수의 영향을 받는 대기천과 탁수의 영향을 거의 받지 않는 봉산천의 어류상을 조사한 결과는 다음 Table 4와 같다. 대기천에서는 4과 13종 385개체, 그리고 봉산천에서는 7과 14종 1,598개체가 각각 채집되어 종수에서는 그리 큰 차이를 보이지 않았으나 종구성과 개체수에서 많은 차이를 보이고 있었다. 특히 개체수에서는 약 4.15배의 차이를 나타내고 있었다. 또한 종구성과 종별 비교 풍부도를 보면 봉산천의 경우 금강모치(*Rhynchocypris*

**Fig. 3.** Comparison of fish family compositions between two different streams.

kumgangensis)가 86.36%로 가장 높았으며, 다음은 독중개(*Cottus poecilopus*) 5.32%, 열목어(*Brachymystax lenok tsinlingensis*) 2.13%, 참갈겨니(*Zacco koreanus*) 2.00% 등의 순으로 나타나 하천의 최상류에 서식하는 어종들이 우점하여 본 하천이 잘 보존되고 있음을 알 수 있었다. 그러나 대기천의 경우 참갈겨니(*Z. koreanus*)가 31.95%로 우점종으로 나타났고, 다음은 중개(*Orthrias nudus*) 22.86%, 금강모치(*R. kumgangensis*), 20.52%, 참중개(*Iksookimia koreensis*) 12.47%, 그리고 모래무지(*Pseudogobio esocinus*) 2.12% 등의 순으로 나타나, 최상류역 하천임에도 불구하고 상류의 하류역이나 중류역에서 많이 서식하는 어종들이 많이 이동해 분포하는 것은 하천의 서식지가 많이 변형되었거나 파괴되었음을 보여주는 결과라 판단된다. 특히 모래를 주 서식지로 하는 참중개(*I. koreensis*)와 모래무지(*P. esocinus*)가 비교적 많이 출현하는 것은 본 하천의 하상구조가 탁수의 영향으로 많이 바뀌었음을 반영한 결과라 생각된다. 따라서 이러한 결과는 탁수에 의해 개체군이 멸종되거나 축소되는 어종들도 있지만, 이와 반대로 개체군이 활성화되는 어종들도 있음을 보여준다. 따라서 탁수에 약한 어종은 열목어(*B. lenok tsinlingensis*), 독중개(*C. poecilopus*) 등으로 생각되며, 강한 어종은 중개(*O. nudus*), 참중개(*I. koreensis*), 모래무지(*P. esocinus*) 등으로 생각된다.

한편 과별 비교풍부도를 비교하여 보면 대기천의 경우 잉어과(Cyprinidae)가 9종으로 전체의 69.23%를 차지하였고 다음은 미꾸리과(Cobitidae) 2종(15.38%), 그리고 독중개과(Cottidae)와 바다빙어과(Osmeridae) 1종(7.69%) 등의 순으로 나타났다. 봉산천은 잉어과(Cyprinidae)가 6종(82.86%)으로 가장 높았고 다음은 미꾸리과

Table 4. Relative abundance, habitat types and the individual number of fishes collected at the Bongsan and Daegi Streams.

Species	The Bongsan Stream		The Daegi Stream		Remarks	Habitat type (ecotype)
	IN	RA	IN	RA		
Cyprinidae						
<i>Pungtungia herzi</i>	1	0.1	4	1.0	Pr	Pl, Po, B
<i>Pseudopungtungia tenuicorpa</i>	8	0.5			Pr, E, L	Pl, Po, B, C
<i>Coreoleuciscus splendidus</i>	27	1.7	4	1.0	Pr, E	Pl, R
<i>Ladislabia taczanowskii</i>			10	2.6	Pr	Pl, Po
<i>Hemibarbus longirostris</i>			3	0.8	Pr	Pl, Po
<i>Pseudogobio esocinus</i>			12	3.1	Pr	Bt, Po, S
<i>Microphysogobio yaluensis</i>			1	0.3	Pr, E	R, B
<i>Rhynchocypris kumgangensis</i>	1,380	86.4	79	20.5	Pr, E	Pl, Po
<i>Zacco koreanus</i>	32	2.0	123	32.0	Pr, E	Pl, Po, R
<i>Zacco platypus</i>	2	0.1	8	2.1	Pr	Pl, Po, R
Cobitidae						
<i>Orthrias nudus</i>	5	0.3	88	22.9	Pr	Bt, R, B, C
<i>Iksookimia koreensis</i>	1	0.1	48	12.5	Pr, E	Bt, Po, S
<i>Koreocobitis rotundicaudata</i>	4	0.3			Pr, E	Bt, R, B, C
Siluridae						
<i>Silurus microdorsalis</i>	3	0.2			Pr, E	Bt, R, B, C
Amblycipitidae						
<i>Liobagrus andersoni</i>	6	0.4			Pr, E	Bt, R, B, C
Osmeridae						
<i>Hypomesus olidus</i>			4	1.0	Ph	Pl, Po
Salmonidae						
<i>Brachymystax lenok tsinlingensis</i>	34	2.1			Ph	Pl, Po, R
Cottidae						
<i>Cottus poecilopus</i>	85	5.3	1	0.3	Ph, L	Bt, R, B, C
Centropomidae						
<i>Coreoperca herzi</i>	10	0.6			Ph, E	Bt, Po, B, C
Number of family	7		4			
Number of species	14		13			
Number of individual	1,598		385			

Pr: Primary freshwater, Ph: Peripheral freshwater, E: Korean endemic species, L: Legal protected species, RA: Relative abundance, IN: Individual number, Pl: Pelagic, Bt: Benthic, Po: Pool, R: Rapid, B: Boulder, C: Cobble, P: Pebble, G: Gravel, S: Sand

(Cobitidae) 3종(21.43%), 그리고 메기과(Siluridae), 통가리과(Amblycipitidae), 연어과(Salmonidae), 독중개과(Cottidae), 꺾지과(Centropomidae) 1종(7.14%) 등의 순으로 나타났다(Fig. 3). 따라서 탁수의 영향을 받는 대기천은 과(Family)다양도가 낮게 나타났으며 특정 과(Family) 즉 잉어과(Cyprinidae)의 출현율이 높아짐을 알 수 있었다. 한편 출현어종들 중 법적보호종(Legal protected species)인 멸종위기종 II는 대기천에서 독중개(*C. poecilopus*) 1종이 지점 1에서 1개체 출현하였고, 봉산천에서는 가는돌고기(*Pseudopungtungia tenuicorpa*)와 독중개(*C. poecilopus*) 2종이 각각 8개체, 85개체가 출현하였다. 또한 한국특산종을 비교해 보면 대기천의 경우 쉬리(*Coreoleuciscus splendidus*) 등 5종(38.46%)이 그리

고 봉산천에서는 가는돌고기(*P. tenuicorpa*) 등 9종(64.29%)이 출현하여, 대기천에서 멸종위기종과 한국고유종의 출현 비율이 봉산천보다는 훨씬 떨어지는 것을 알 수 있었다(Fig. 4). 결국 탁수의 영향으로 하천의 고유성이 떨어지고, 더 나아가 이러한 어종들의 서식지가 파괴됨을 알 수 있다. 이와 같이 위에서 말한 결과들을 종합해 볼 때, 하천의 유역으로부터 대량의 토사유입은 하천 바닥의 자갈이나 바위틈새를 메워 생물서식지를 단순화시키고, 하천의 일차생산자인 부착조류나 저서생물을 매물시킴으로서 먹이사슬을 단절하여 생물 다양성을 감소시키는 요인이 되며, 또한 난과 치어들의 부화율과 생존율을 감소시킨다(Shapovalop and Berrian, 1939; Wickett, 1954; Coble, 1961; Silver *et al.*, 1963; Shelton and

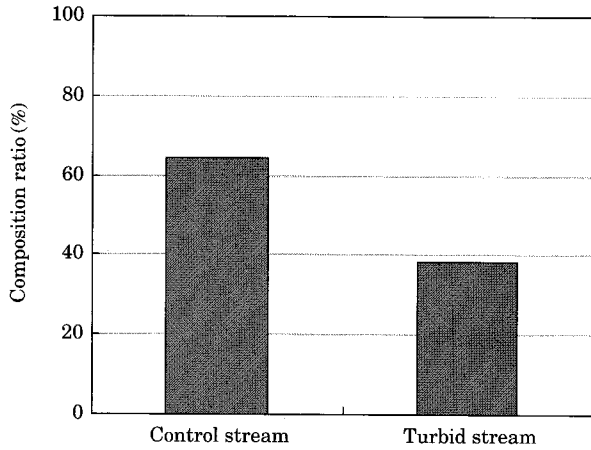


Fig. 4. Comparison of the Korean endemic species between two different streams.

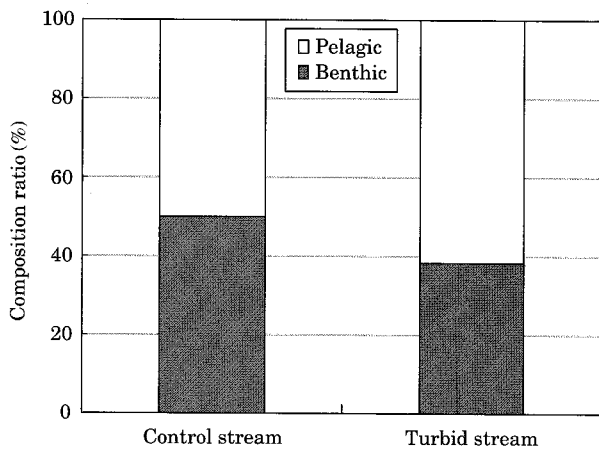


Fig. 5. Comparison of the fish ecotypes composition between two different streams.

Pollock, 1966; Cederholm and Salo, 1979; Maret *et al.*, 2003).

2) 어류군집 비교 · 분석

탁수의 발생은 위에서 말한 바와 같이 어류상을 변화시키지만 궁극적으로는 어류의 군집까지 변화시킬 것으로 판단된다. 어류를 부유성(Pelagic) 또는 저서성(Benthic)으로 나누어 구분한 결과, 봉산천에서는 부유성과 저서성 어종이 고르게 분포하여 구성비가 각각 50%로 나타났으며 대기천에서는 부유성 어종보다는 저서성 어종의 구성비가 38.46%로 낮게 나타났다(Fig. 5). 이러한 결과는, 대기천이 탁수(모래, 세립자) 영향으로 인하여 하상, 즉 자갈이나 돌 틈 등이 모래 등으로 메워졌기 때문인 것으로 생각된다(Table 1). 즉 이러한 서식지 매몰이

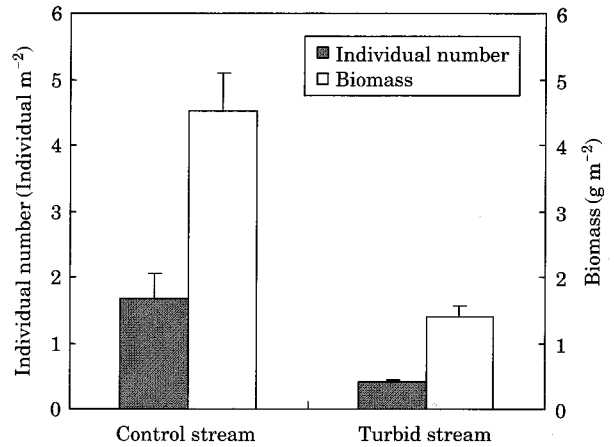


Fig. 6. Comparison of fish density between two different streams.

지속적으로 일어난다면 어류의 이동이나 사멸을 가져오게 될 것이고, 나아가 어류상과 어류군집의 변화를 가져오게 된다.

(1) 단위면적당 밀도

대기천과 봉산천의 단위 면적당 밀도를 비교해본 결과, 탁수하천인 대기천에서는 단위면적당 개체수가 0.40 (± 0.04)개체 m⁻², 무게는 1.40 (± 0.16) g m⁻²으로 나타났으며, 자연형하천인 봉산천에서는 단위면적당 개체수가 1.66 (± 0.38)개체 m⁻², 무게는 4.51 (± 0.59) g m⁻²으로 각각 나타났다. 따라서 단위면적당 개체수는 대기천에서 4.1배, 그리고 무게는 3.2배 감소한 것으로 나타났다(Fig. 6).

(2) 어류군집 분석

조사하천인 대기천과 봉산천의 군집의 특성을 파악하기 위하여 내린천의 지점들과 또 다른 탁수 하천인 자연천, 그리고 상류하천인 계방천과 군집분류 및 분석을 통하여 어류군집의 변화 추이를 알아보고자 하였다(Fig. 7).

집괴분석결과, 봉산천은 내린천의 최상류인 지점 1번과 그리고 또 다른 자연형 하천인 계방천과 어류군집이 비슷한 것으로 나타나 비교적 수계가 잘 보존되고 있음을 알 수 있었다. 그러나 대기천의 어류군집은 다른 하천들의 어류군집과 유사도가 매우 낮게 나타나, 전혀 다른 어류군집의 형태를 보여주었다고 생각된다. 즉, 대기천의 어류군집은 최상류의 어류군집에서 전혀 다른 군집으로 변화했거나 매우 불안정한 상태를 반영하였다고 본다. 따라서 이러한 군집의 변화는 탁수가 어류군집에 만성적인 독소로 작용한 결과라 생각된다.

이와 같이 상이한 어류군집을 보이는 것은 강우시 발

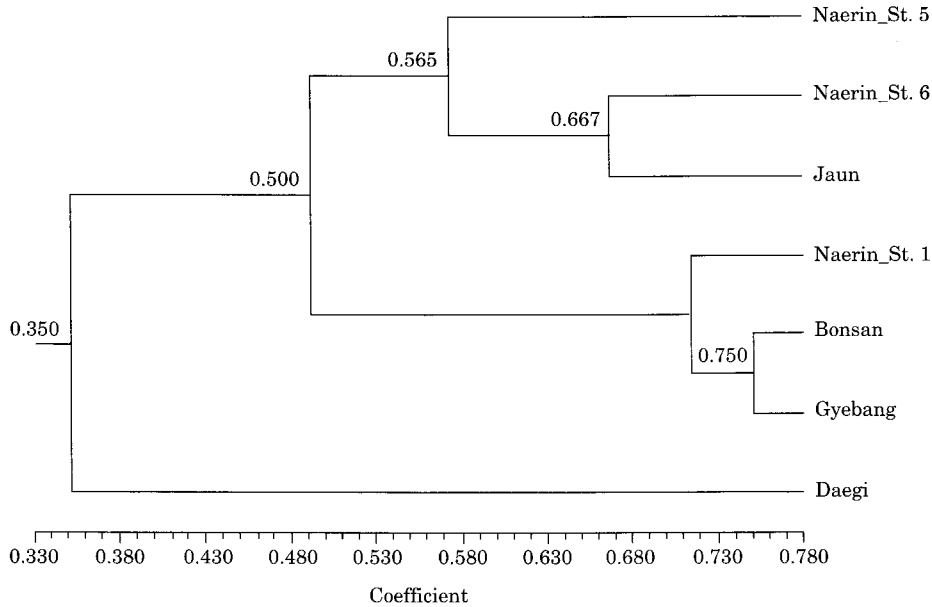


Fig. 7. Cluster analysis of fish communities in the Daegi Stream and the Bongsan Stream and other neighbouring streams with similar size.

생하는 탁수에 의한 서식지 교란이 크기 때문인 것으로 사료된다. 하천에서 탁수의 발생은 유역 내 토지이용현황과 밀접한 관계가 있으며, 탁수하천인 자운천과 대기천의 강우시 단위면적당 SS 유출 부하량이 크고, 탁수에 의해 서식지가 받고 있는 Stress는 84배 이상으로 이러한 서식지 교란으로 인해 어류군집의 변화가 나타났을 것으로 판단된다. 대기천은 상류하천이지만 어류군집의 측면에서 보면 중·하류성 군집특성을 보이고 있다. 최상류성 어종인 열목어나 독중개 등, 탁수에 대한 내성이 약한 어종들은 전혀 나타나지 않았으며, 탁수와 함께 유입된 영양염류로 인하여 하천의 중·하류지역에 서식하는 피라미나 갈겨니 등이 우점하는 하천으로 군집의 변화가 뚜렷하게 일어난 것으로 사료된다.

하천에서 발생하는 부유물질은 농도만으로는 어류의 급성독성이나 생리적, 행동학적 영향을 나타내기에는 부적합하다. 부유물질 농도에 따른 노출시간으로 결정되는 Stress index는 수 생태계의 영향을 대표하는 유용한 지수이다(Newcombe and Mac Donald, 1991). 미국의 경우 Stress index는 하천에서 부유물질이나 부유토사에 대한 다양한 어류의 영향과 반응을 대표하는 지수로서 이용되고 있으며, 이에 대한 많은 연구가 이루어졌다. Stress index에 대한 어류의 반응은 생물종, 농도, 노출시간 등에 따라 다양하게 나타나고 있다. 따라서 국내에서도 이에 대한 본격적인 연구가 필요하다고 본다.

탁수가 어류 및 수 환경생태계에 미치는 영향을 고려하여 많은 연구 그룹에서 탁수의 범위를 제시하고 있다. Griffiths and Walton (1978)에 따르면 부유토사에 대한 어류의 내성한계는 $80 \sim 100 \text{ mg L}^{-1}$, 저서생물은 $10 \sim 15 \text{ mg L}^{-1}$ 이하인 것으로 보고하고 있다. 유럽의 내수면 위원회(European Inland Fisheries Advisory Commission: EIFAC, 1964)는 부유물질의 범위에 따른 어류서식지의 영향을 제시하고 있다. 부유물질 25 mg L^{-1} 이하에서는 어류서식지의 큰 피해가 나타나지 않지만 400 mg L^{-1} 이상에서는 서식환경이 심각한 피해를 받는 것으로 보고하고 있다. USEPA (Mills *et al.*, 1985)는 수환경서식지를 고려한 부유물질의 농도가 10 mg L^{-1} 이하에서는 영향이 없으며, $10 \sim 100 \text{ mg L}^{-1}$ 범위에서는 잠재적 영향이 나타나고, 100 mg L^{-1} 이상에서 영향이 크게 나타나는 것으로 보고하고 있다. 특히 탁수의 농도가 연간 25 mg L^{-1} 이상이 31일간 지속되는 경우, 또한 80 mg L^{-1} 이상이 11일 이상 지속되는 경우 하천의 어류서식지는 심각한 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 이를 Stress index로 환산하면 $9.8 \sim 10.0 \text{ yr}^{-1}$ 정도 된다. 본 연구결과에서 탁수의 영향이 크게 나타나는 대기천의 강우시 SI 중앙값은 10.37 정도로써 이는 하천 서식지에 심각한 영향을 줄 수 있는 범위이며, 이로 인해 탁수하천에서 어류군집의 변화가 일어났을 것으로 사료된다. 따라서 탁수는 어류의 개체수 개체군을 사멸시킬 확률이 높지 않으나, 강한 스트레스

아래에서 어류군집은 충분히 변화시킬 수 있다.

적 요

동일 수계에 위치하며 하천의 규모가 비슷하지만 유역의 특성에 따라 강우시 탁수의 영향을 크게 받는 탁수하천과 대조하천을 대상으로 어류서식지 및 군집구조의 특성을 비교하였다. 탁수하천인 대기천의 하천바닥은 주로 모래로 구성되었으며, 대조하천인 봉산천과 계방천은 큰 돌과 작은 돌이 우점하였다. 강우시 탁수하천에서 강우량에 따른 단위면적당 SS 유출은 대조하천에 비해 4~200배 정도 높았으며, 이에 따른 서식지의 스트레스 지수는 탁수하천이 약 84배 정도 더 크게 받는 것으로 나타났다. 탁수하천과 대조 하천 간에 출현종수는 큰 차이를 보이지 않았지만 우점종은 서로 다르게 나타났다. 맑은 하천인 봉산천에서는 하천의 최상류어종인 금강모치, 열목어, 독중개 등이 우점하였으나, 탁수하천인 대기천에서는 금강모치와 참갈겨니, 중개 등 하천의 중·상류성 어류들이 우점하는 것으로 나타났다. 단위면적당 어류밀도를 비교해본 결과, 탁수하천인 대기천은 대조하천인 봉산천에 비해 1/4로 낮게 나타났다. 집괴분석결과 대기천의 어류군집은 다른 하천의 어류군집과 전혀 다르게 나타났으며, 봉산천은 최상류의 어류군집을 유지하고 있는 것으로 나타났다. 결론적으로, 탁수는 어류의 개체나 개체군을 사멸시킬 확률이 높지 않으나, 강한 스트레스 아래에서 어류군집은 충분히 변화할 수 있다. 같은 수계에서 우점종의 차이가 나타난 것은 탁수가 군집수준에서 만성생태 특성으로 작용하였음을 보여주는 결과이다.

인 용 문 헌

- 김익수. 1997. 한국동식물도감. 제37권 동물편 (담수어류). 교학부. p. 133-520.
- 김익수, 강언중. 1993. 원색 한국어류도감. 아카데미서적. p. 252-264.
- 남명모, 양홍준, 채병수, 장영훈. 1998. 내린천의 어류상과 군집구조. *한어지* 10: 61-66.
- 최기철, 전상린, 김익수, 손영목. 1990. 원색한국담수어도감. 향문사. 277p.
- 한강수계관리위원회. 2004. 탁수로 인한 수중생태계 영향조사 및 저감대책 제시, 한강유역환경청.
- 홍재상, 서인수, 윤건탁, 황인서, 김창수. 2004. 강릉 남대천 하구역의 1997년 9월 중 대형저서동물 분포패턴, *환경생물* 22: 341-350.
- Bash, J., C. Berman and S. Bolton. 2001. Effects of turbidity and suspended solids on Salmonids. WA-RD 526.1. Univ. of Washington, Seattle, WA.
- Cederholm, C.J. and E.O. Salo. 1979. The effects of logging road landslide siltation on the salmon and trout spawning gravels of Stequaleho Creek and the Clearwater River basin, Jefferson County, Washington, 1972-1978. FRO-UW-7915. Fisheries Research Institute, University of Washington, Seattle, WA. 99p.
- Chapman, D.W. 1988. Critical review of variables used to define effects of fines in redds of large salmonids. *Transactions of the American Fisheries Society* 117: 1-21.
- Cobel, D.W. 1961. Influence of water exchange and dissolved oxygen in redds on survival of steelhead trout embryos. *Transactions of the American Fisheries Society* 90: 469-474.
- Cummins, K.W. 1962. An evaluation of some techniques for the collection analysis of benthic samples with special emphasis on lotic waters. *American Midland Naturalist* 67: 477-504.
- EIFAC (European Inland Fisheries Advisory Commission). 1964. Water quality criteria for European freshwater fish: report on finely divided solids and inland fisheries. United Nations, Food and Agriculture Organization, EIFAC Technical Paper 1, Rome.
- Gorman, O.T. and J.R. Karr. 1978. Habitat structure and stream fish communities. *Ecology* 59: 507-515.
- Griffiths, W. and B. Walton. 1978. The effects of sedimentation on the aquatic biota. Alberta Oil Sands Environmental Research Program, Report No. 35.
- Huter, J.W. 1973. A discussion of game fish in the State of Washington as related to water requirements. Report of Washington State Department of game, Fishery Management Division, to the Washington State Department of Ecology, Olympia, WA.
- Jaccard, P. 1908. Nouvelles recherches sur la distribution florale. *Bulletin Societe Sciences Naturelle* 44: 223-270.
- Kim, I.S., M.K. Oh and K. Hosoya. 2005. A new species of cyprinid fish, *Zacco koreanus* with redescription of *Z. temminckii* (cyprinidae) from Korea. *Korean J. Ichthyol.* 17: 1-7.
- Lloyd, D.S. 1987. Turbidity as a water quality standard for salmonid habitats in Alaska. *Nor. Am. J. Fish. Manag.* 7: 34-45.
- Maret, T.R., T.A. Burton, G.W. Harvey and W.H. Clark. 2003. Field testing of new monitoring protocols to assess brown trout spawning habitat in Idaho streams. National Water Quality Assessment (NAWQA) Program, Upper Snake River Basin Study and Idaho Department

- of Environmental Quality. Available: www.idaho.wr.usgs.gov/journals/fieldtest.html (April 2003).
- Mills, W.B., D.B. Porcella, M.J. Unga, S.A. GhErini and K.V. Summers. 1985. Water quality assessment: a screening procedure for toxic and conventional pollutions in surface and ground water. U.S. Environmental Protection Agency, Report 600/6-85/0.02a, Athens, GA.
- Mountfold, M.D. 1962. An index similarity and its application to classification to classificatory program. In Murphy, P.W. (Ed.). *Prog. Soil. Aool. Butt.* p. 43-50.
- Nelson, J.S. 1994. *Fishes of the world*. John Wiley & Sons, New York. 600p.
- Newcombe, T.W. and D.D. MacDonald. 1991. Effects of suspended sediments on aquatic ecosystems. *North American Journal of Fisheries Management* **11**: 72-82.
- Noggle, C.C. 1978. Behavioral, physiological and lethal effects of suspended sediment on juvenile salmonids. Master's thesis. Univ. of Washington, Seattle, WA.
- Reed, J.P., J.M. Miller, D.F. Pence and B. Schaich. 1983. The effects of low level turbidity on fish and their habitat. Report No. 190. North Carolina State Univ. Raleigh, NC.
- Shapovalov, L. and W. Berrian. 1939. An experiment in hatching silver salmon (*Oncorhynchus kisutch*) eggs in gravel. *Trans. Am. Fish. Soc.* **69**: 135-140.
- Shelton, J.M. and R.D. Pollock. 1966. Siltation and egg survival in incubation channels. *Trans. Am. Fish. Soc.* **95**: 183-187.
- Sigler, J.W., T.C. Bjornn and F.H. Everest. 1984. Effects of chronic turbidity on density and growth of steelheads and coho salmon. *Trans. Am. Fish. Soc.* **113**: 142-150.
- Silver, S.J., C.E. Warren and P. Doudoroff. 1963. Dissolved oxygen requirements of developing steelhead trout and chinook salmon embryos at different water velocities. *Trans. Am. Fish. Soc.* **92**: 327-343.
- Wickett, W.P. 1954. The oxygen supply to salmon eggs in spawning bed. *J. Fish. Res. Board Can.* **11**: 933-953.

(Manuscript received 30 August 2007,
Revision accepted 6 September 2007)