

시화호 수질 악화에 따른 시화호와 주변 해역 어류의 종조성 변화

이태원 · 문형태 · 허성희¹
충남대학교 해양학과, ¹부경대학교 해양학과

Changes of Species Composition of Fish in Polluted Lake Shihwa and Adjacent Coastal Area

TAE WON LEE, HYUNG TAE MOON AND SUNG HOI HUH¹

Department of Oceanography, Chungnam Nat'l University, Taejon 305-764, Korea
¹Department of Oceanography, Pukyong Nat'l University, Pusan 608-737, Korea

시화호가 건설된 후인 1995년 10월에서 1996년 8월 사이 시화호 내부와 외부에서 계절 별로 어류를 채집하여, 출현종의 조성 변화를 분석하고 내부의 수질이 어류에 미치는 영향을 고찰하였다. 호수 외부에서는 청어목 어류 및 참서대와 민태가 우점하여 인접 해역과 유사한 경향을 보였다. 호수 내에서는 가을에 연안성 부어류, 망둑어류 및 민물어류인 붕어가 채집되었으나, 겨울이 지난 후 외해에서 월동하여야 하는 부어류들은 채집되지 않았고, 망둑어류와 붕어도 숫적으로 감소하였다. 봄이 되어 소수 풀망둑을 제외한 어류는 채집되지 않았고, 여름에는 해수와 호수물 교환 과정에서 들어 온 두돌망둑과 구굴무치가 대량 출현하였으나 8월 중순 폐사하였다. 1996년 3월 이후 암모늄 농도는 다른 어류에서 관찰된 반치사농도보다 높았으며, 수온과 pH의 상승으로 암모니아의 어류에 대한 독성이 강하여지고 다른 요인들과 복합적으로 작용하여 어류들이 폐사한 것으로 보인다.

Changes of fish species composition were analyzed using seasonal samples collected from Lake Shihwa and adjacent coastal water from October 1995 to August 1996. Pelagic clupeids, *Cynoglossus joyneri* and *Johnius belengerii* predominated in abundance in the adjacent coastal water. In the lake, clupeids, gobies and freshwater *Carassius carassius* were collected in autumn. The clupeids, unable to overwinter in the open water, disappeared after winter. The gobies and *C. carassius* were also disappeared in spring except a few number of *Acanthogobius hasta*. A large number of *Tridentiger trignocephalus* and *Eleotris oxycephala* were collected in summer, supposed to move into the lake during the exchange of water in lake and sea water. However, they were all died in the middle of August. The concentration of ammonium-nitrogen was higher than 2 mg/l, which was higher than 50% lethal concentration in other fishes. Increase in temperature and pH in spring may elevate the toxicity of ammonium to fish. We discussed the effect of the other factors of the polluted water in the lake on the disappearance of fish.

서론

온대 연안의 내만은 수심이 얕아 대기나 육지의 영향을 크게 받아 계절에 따른 수온 성분 변화가 심하여, 해양생물의 계절 변화가 심한 편이다. 근래에 서해 연안에는 방조제 건설과 매립이 계속되고 있어 해안선이 변형되면서 해수유동 및 퇴적 작용이 변하고, 매립 후 공단이 조성되고 이에 따라 인구가 증가하면서 오폐수 양이 증가하여 연안의 수질이 악화되어 가고 있다(국립수산진흥원, 1996). 이러한 인위적 환경 변화는 물리화학적 작용을 거치며 점진적으로 해양생태계에 영향을 미친다. 특히, 연안생물은 환경 변화에 대한 적응범위가 넓은 편으로 점진적으로 변하는 연안생물 변화를 파악하기 위하여는 장기 자료가 요구된다. 중장기 자료수집을 통하여 아산만과 천수만의 경우 방조제가 건설된 이후 연안생물의 종조성이 점진적으로 바뀌어 가고 있는 사실이 밝혀졌고(이, 1995; 이, 1996), 이와 같은 변화

는 정도의 차이는 있어도 인위적 환경 변화가 있는 서해 연안의 일반적인 현상으로 보인다.

방조제 건설 후 방조제 밖 연안 어류에 대한 연구는 일부 수행되었으나 방조제 내에 갇힌 어류의 동태에 관한 연구는 빈약한 편이다. 온대 연안은 수온의 계절 변화가 심하여 계절에 따른 어류 종조성 변화가 심하다. 겨울에는 내만의 일부 주거종을 제외하고는 외해에서 월동하며, 주거종이라도 겨울에는 수심이 깊은 곳으로 이동한다. 따라서 냉수기에는 출현종수와 생물량이 적고, 봄이 되어 수온이 상승하면서 외해에서 월동한 어류들이 몰려와 산란하고, 그 유어들이 가을까지 내만에 머물러 높은 생물량을 유지한다(Lee and Seok, 1984). 서해 내만에서 난수기 높은 생물량을 유지하는 어류는 멸치, 밴댕이, 곤어리 등의 회유성 부어류, 민태같은 회유성 저어류 및 내만성 참서대이다. 천해역에는 주거종인 망둑어류들이 높은 생물량을 유지한다. 방조제가 건설되어 회유성어류들이 내부에 갇히면 월동을 위하여 이동하

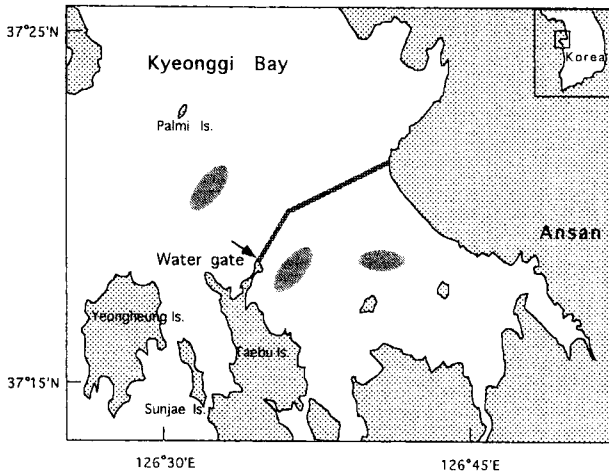


Fig. 1. Map of Sampling sites.

지 못하여 외부의 정상적인 어류와는 다른 행동양상을 보일 것이 예상되며, 특히, 시화호와 같이 호수의 물이 담수화되고 수질이 악화되는 환경에서는 주거종인 어류도 영향을 받을 것으로 보인다.

본 연구에서는 시화호에 갇힌 어종의 특성을 호수 밖 어종과 비교하여 그 특성을 밝히고, 담수화 및 수질이 악화되는 과정에서 어류 종조성 변화 양상을 파악하고 수질 및 다른 생태 요인과 연관하여 토의하였다.

재료 및 방법

재료는 1995년 11월, 1996년 2월, 5월 및 8월에 시화호 내의 2개의 정점과 만 외부 1개 정점에서 otter trawl을 이용하여 채집하였다(Fig. 1). 시화호 내에는 바닥이 세립퇴적물이고 폐기물이 산재하여 소형 otter trawl을 이용하였고, 외해는 조류가 강하여 시화호에서 보다 큰 그물을 이용하였다. 시화호 내 채집에 이용된 otter trawl은 날개그물이 5.5 m(망목 24 mm), 몸통 및 자루그물(cod end)이 7.7 m(망목 15 mm)이었다. 각 정점에서 30분 예인을 원칙으로 하였으나, 해저에는 폐기물이 많아 그물이 걸려 30분간 예인할 수 없는 경우는 총 예인 시간이 30분이 되도록 반복하였다. 외해에서 이용한 otter trawl은 날개그물(wing net)이 7.5 m (24 mm), 몸통 및 자루그물이 약 8 m (망목 22 mm)이었으며, 예인 시간이 60분이 되도록하였다. 외해에서는 1996년 11월에는 기상 사정으로 채집하지 못하였고, 2월에는 한 개체도 채집되지 않았다.

채집된 어류는 냉장보관하여 실험실로 운반한 후, 동정 분류하고 각 어류의 체장 및 체중을 측정하였다. 종의 분류에는 정(1977), Masuda et al.(1984) 등을 이용하였다. 각 정점의 종조성을 이용하여 Shannon and Wiener의 종다양성 지수를 계산하였다(Shannon and Weaver, 1949).

연령을 사정하기 위하여 각 어류의 이석을 추출하였다. 추출된 이석은 알콜로 표면의 유기물을 세척한 후 건조하여 보관하였다.

결 과

종조성

조사기간 중 시화호에서는 11종, 1,354마리, 11,808.8 g(습중, 이하 같음)의 어류가 채집되었다. 주변해역에서는 5목 12과 12종이 출현하였으며, 청어과의 3종을 제외하고는 시화호에서 채집된 종과 다른 종이였다(Table 1). 시화호에서 채집된 어류는

Table 1. List of fish species collected by an otter trawl in Lake Siwha and adjacent coastal area from November 1995 to August 1996.

a. Siwha Lake

Order Perciformes (농어목)

Family Gobiidae (망둑어과)

Acanthogobius hasta (풀망둑)

Acanthogobius ommaturus (가실망둑)

Chaenogobius laevis (미끈날망둑)

Tridentiger trignocephalus (두줄망둑)

Family Eleotridae (구굴무치과)

Eleotris oxycephala (구굴무치)

Order Clupeiformes (청어목)

Family Clupeidae (청어과)

Sardinella zunasi (뱀망이)

Family Dorosomatidae (전어과)

Konosirus punctatus (전어)

Family Engraulidae (멸치과)

Engraulis japonicus (멸치)

Thrissa koreana (곤어리)

Order Cottiformes (횃대목)

Family Cottidae (독중개과)

Thrachidermus fasciatus (걱정어)

Order Cypriniformes (잉어목)

Family Cyprinidae (잉어과)

Carassius carassius (붕어)

b. Adjacent coastal area

Order Perciformes (농어목)

Family Gobiidae (망둑어과)

Chaeturichthys stigmatias (쉬쉬망둑)

Family Apogonidae (동갈돔과)

Apogon lineatus (열풍가리돔)

Family Sciaenidae (민어과)

Johnius belengerii (민태)

Family Zoarcidae (등가시치과)

Zoarcis gillii (등가시치)

Family Callionymidae (뚝양태과)

Repomucenus lunatus (뚝양태)

Order Clupeiformes (청어목)

Family Dorosomatidae (전어과)

Konosirus punctatus (전어)

Family Engraulidae (멸치과)

Thrissa koreana (곤어리)

Order Cottiformes (횃대목)

Family Hexagrammidae (쥐노래미과)

Hexagrammos otakii (쥐노래미)

Family Psychrolutidae (물수배기과)

Hemitripterus villosus (삼세기)

Family Scorpaenidae (양볼낙과)

Sebastes schlegelii (조피볼낙)

Order Pleuronectiformes (가자미목)

Family Cynoglossidae (참서대과)

Cynoglossus joyneri (참서대)

Order Tetraodontiformes (복어목)

Family Tetraodontidae (참복과)

Takifugu niphobles (복섬)

연안 주거성 저어류, 회유성인 부어류 및 민물종으로 대별할 수 있었다. 저어류는 망둑어과(Family Gobiidae)가 4종, 이와 유사한 형태의 구굴무치(*Eleotris oxycephala*) 및 걱정이가 채집되었다. 부어류는 청어목어류만 4종 출현하였고, 민물종으로는 붕어(*Carassius carassius*)가 출현하였다.

시화호에서 채집된 어류는 출현빈도에서는 풀망둑(*Acanthogobius hasta*)과 두줄망둑(*Tridentiger trignocephalus*)이 3계절, 붕어가 2계절 출현하였고, 나머지 종들은 1회씩 출현하여 채집 시기에 따른 종조성 변화가 심하였다(Table 2). 양적으로는 두줄망둑, 구굴무치 및 풀망둑이 100마리 이상 채집되어 전체 개체수의 88%를 차지하였다. 인접해역에서는 돛양태(*Repomucenus lunatus*)가 5월과 8월 출현하였고, 나머지 종들은 한시기에만 출현하였다. 민태(*Johnius belengerii*), 곤어리(*Thrissa koreana*) 및 참서대(*Cynoglossus joyneri*)가 수십마리씩 채집되었을 뿐 나머지 종들은 10마리 미만이 채집되었다.

종조성의 계절변화

1995년 11월에는 시화호에서 총 10종, 291마리, 6,951.2 g의 어류가 채집되었다(Table 2). 기상 사정으로 호수 밖 정점에서는 채집하지 못하였다. 채집된 어류 가운데 망둑어과 어류가 4종, 청어목어류가 4종, 걱정이 및 담수어인 붕어도 채집되었다. 4종의 망둑어과 어류와 걱정이는 기수성 어류로 비교적 염분 적응 범위가 넓은 어류들이다. 이에 비하여 부어류인 청어목 어류는 외해에서 월동하고 봄에 내만으로 몰려와 산란하는 어류이며, 가을에 수온이 낮아지면 월동하기 위하여 외해로 회유하는 어류들이다(Lee and Seok, 1984). 조사 때의 수온이 이미 낮아져 내만에서는 이 부어류들이 대부분 외해로 이동하였을 수온이다. 또, 염분도 이들 부어류들에게는 낮은 상태로 외해로의 통로가 막혀 이동하지 못하고 방조제 내부에 머물고 있는 것으로 판단된다.

채집된 어류 가운데 풀망둑(*Acanthogobius hasta*)이 137마리로 가장 많았고, 다음으로는 전어(*Konosirus punctatus*)가 85마

Table 2. Seasonal species composition of fish collected by an otter trawl in Lake Shihwa and adjacent coastal water from November 1995 to August 1996. N and W represent the number of individuals and biomass, respectively. Samples in a were hauled for 30 min and those in b were hauled for 60 min.

a. Lake Shihwa

Species	November '95		March '96		May '96		August '96		Total	
	N	W	N	W	N	W	N	W	N	W
<i>Acanthogobius ammaturus</i>	10	31.8							10	31.8
<i>Acanthogobius hasta</i>	137	4495.5	63	2614.7	3	146.3			190	6966.1
<i>Carassius carassius</i>	6	270.4	7	58.4					13	328.8
<i>Chaenogobius laevis</i>	1	2.9							1	2.9
<i>Eleotris oxycephalus</i>							345	782.7	345	782.7
<i>Engraulis japonicus</i>	1	10.0							1	10.0
<i>Sardinella zunasi</i>	33	275.4							33	275.4
<i>Konosirus punctatus</i>	85	1702.3							85	1702.3
<i>Thrissa koreana</i>	11	72.8							11	72.8
<i>Trachidermus fasciatus</i>	2	64.0							2	64.0
<i>Tridentiger trignocephalus</i>	5	26.1	1	5.3			657	1540.6	663	1572.0
No. of species	10		3		1		2		11	
Total	291	6951.2	58	2388.0	3	146	1002	2323.3	1354	11808.8
Diversity(H')	1.42		0.39				0.64		1.38	

b. Adjacent coastal water

Species	March '96		May '96		August '96		Total	
	N	W	N	W	N	W	N	W
<i>Apogon lineatus</i>					1	10.0	1	10.0
<i>Chaeturichthys stigmatias</i>					1	6.9	1	6.9
<i>Cynoglossus joyneri</i>					37	927.3	37	927.3
<i>Hemirhamphus villosus</i>			5	1635.0			5	1635.0
<i>Hexagrammos otakii</i>			6	478.6			6	478.6
<i>Johnius belengerii</i>					30	380.9	30	380.9
<i>Konosirus punctatus</i>					2	75.1	2	75.1
<i>Repomucenus lunatus</i>			3	39.4	4	104.2	7	143.6
<i>Sebastes schlegeli</i>			2	400.7			2	400.7
<i>Takifugu niphobles</i>			5	255.1			5	255.1
<i>Thrissa koreana</i>					98	977.8	98	977.8
<i>Zoareces gillii</i>			3	171.2			3	171.2
No. of species			6		7		12	
Total	0	0	24	2980.0	173	2482.2	197	5462.2
Diversity(H')			1.73		1.15		1.57	

리 채집되어, 이 두 종이 전 개체수의 76%, 생체량의 89%를 차지하였다.

1996년 3월에는 호수 내부에서는 3종, 71마리, 2,678.4 g의 어류가 채집되었고, 호수 외부에서는 한 마리도 채집되지 않았다 (Table 2). 호수내에서 채집된 종 가운데 풀망둑이 63마리로 가장 많았고 붕어가 7마리, 두줄망둑이 1마리 채집되어 가을에 비하여 빈약한 양상을 보였다.

1996년 5월에는 시화호에서는 풀망둑 3마리 만이 채집되었고, 외부 정점에서는 6종, 24마리, 2,980 g이 채집되었다. 황해 연안에서 5월에는 수온이 상승하며 외해에서 월동한 어류들이 연안으로 몰려 오는 시기로 연중 가장 높은 생물량을 보이는 때이다. 그러나, 시화호 내에서는 가을에 채집되었던 종도 채집되지 않아, 외해 월동종은 겨울의 낮은 수온과 염분을 견디지 못하였을 가능성이 있다. 그러나 생존이 가능한 기수종들도 채집되지 않아 수질악화와 관계가 있는 것으로 보인다. 채집과정에서 심하게 부패된 풀망둑이 수 개체 채집되어 수질 악화가 크게 영향을 주었을 가능성이 있다. 만 외부에서 채집된 종들은 연안성 주거종들로, 겨울에는 수심이 깊은 곳으로 이동하고 봄이 되면 천해역까지 이동하는 종들로 구성되어 있었다.

1996년 8월에는 시화호에서는 두줄망둑과 구굴무치 2종이 대량 채집되었고, 인접해역에서는 7종, 173마리, 2,482.2 g이 채집되었다. 두줄망둑과 구굴무치는 성어들로 산란직전의 상태였다. 인접해역에서 채집된 어류는 주거종인 쉬쉬망둑을 제외하면, 외해에서 월동하고 늦봄에 연안으로 몰려와 산란하고, 유어들

이 내만에서 가을까지 자라는 어류들이었다.

우점종의 체장조성

풀망둑: 1995년 11월에 채집된 풀망둑의 체장범위는 100~260 mm였으며, 160~170 mm에서 최빈값을 보였다(Fig. 2). 연령 조성을 보면 100~110 mm인 개체는当年생(1995연도군)이었고, 2년생(1993 연도군)은 200 mm를 넘었으며, 나머지 대부분은 1년생(1994연도군)이었다. 1996년 3월에 채집된 풀망둑은 300 mm인 개체가 한 마리 채집된 것을 제외하고는 11월과 유사한 체장 분포를 보였다. 연령의 조성도 1~2년생으로 구성되어 있었다. 5월에 채집된 3마리는 11월이나 3월에 주를 이루었던 체장 100~260 mm 크기의 개체는 한 마리도 채집되지 않고, 체장 80 mm, 260 mm 및 290 mm인 개체 3마리가 채집되었다.

풀망둑은 한반도 주변에 서식하는 망둑어과 어류 가운데 가장 크기가 큰 어류로, 성어는 비교적 수심이 깊은 곳에 서식한다. 2~3월 경 성어는 내만으로 몰려와 이른 봄 산란하는 것으로 알려져 있다. 유어들은 천수만의 경우 조간대 부근 천해역에 나타나기 시작하여 늦가을 까지 머물며 자란다(임과 이, 1990). 자라면서 유어들은 비교적 수심이 깊은 곳으로 이동하는 것으로 알려져 있다.

전어: 1995년 11월에 채집된 전어의 체장범위는 99.1~155.5 mm의 범위로, 130~150 mm 크기의 개체가 주를 이루었다(Fig. 3). 천수만 전어는 외해에서 월동하고 5월부터 내만으로 몰려와 산란하고 유어들은 늦가을 수온이 8°C 이하로 내려 갈 때까지 내

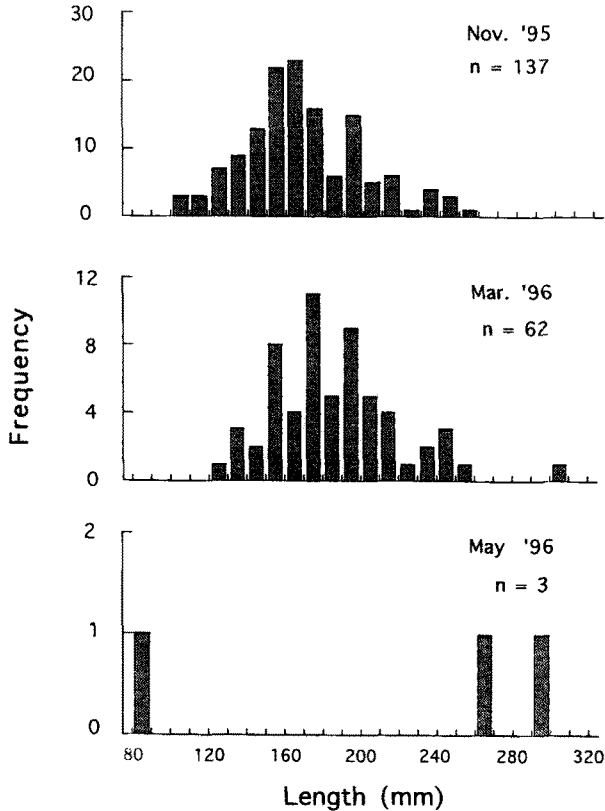


Fig. 2. Length frequency distribution of *Acanthogobius hasta* collected from Lake Shihwa from November 1995 to May 1996.

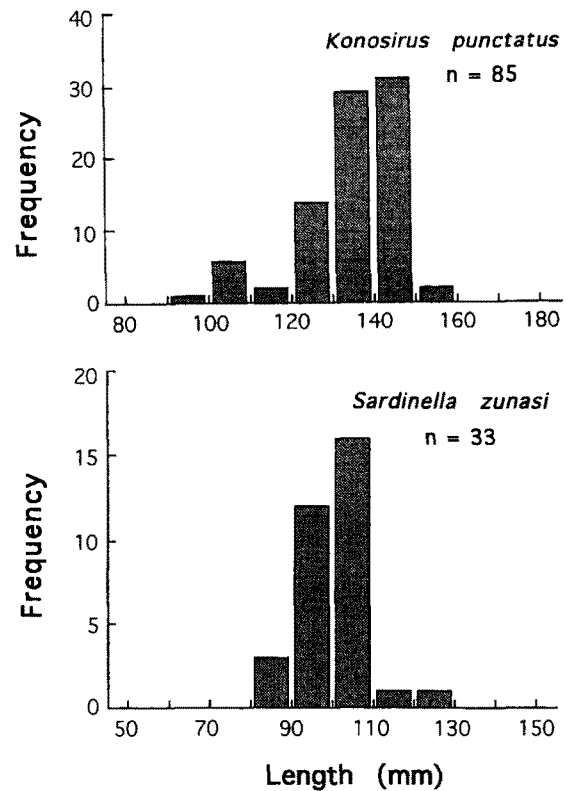


Fig. 3. Length frequency distribution of *Konosirus punctatus* and *Sardinella zunasi* collected from Lake Sihwa in November 1995.

Table 3. Mean, standard deviation and range of fish length collected by an otter trawl from Lake Shihwa.

Species	n	Mean ± SD	Range
<i>Acanthogobius hasta</i> (풀망둑)	137	168.8 ± 30.9	103.0-250.0
<i>Acanthogobius ommaturus</i> (가실망둑)	10	68.8 ± 6.5	56.2-78.0
<i>Carassius carassius</i> (붕어)	6	130.8 ± 33.3	80.0-178.0
<i>Chaenogobius leavis</i> (미끈날망둑)	1	71.4	
<i>Engraulis japonicus</i> (멸치)	1	112.0	
<i>Konosirus punctatus</i> (전어)	85	135.2 ± 12.5	99.1-155.5
<i>Sardinella zunasi</i> (밴댕이)	33	101.6 ± 9.2	88.0-138.0
<i>Thrissa koreana</i> (곤어리)	11	96.3 ± 15.8	84.3-140.4
<i>Trachidermus fasciatus</i> (꺼정어)	2	137.6	137.0-138.1
<i>Tridentiger trignocephalus</i> (두줄망둑)	5 Nov. '95	67.9 ± 6.4	62.0-76.3
	43 Aug. '96	55.3 ± 7.16	30.8-70.2
<i>Eleotris oxycephala</i> (구굴무치)	24	55.8 ± 4.72	45.5-64.8

만에서 성장한다(Lee, 1983). 봄에 부화한 전어는 늦가을에 130 mm 정도까지 이르며, 본 조사의 개체들은 대부분 1년생이었으며, 작은 개체들은 당년에 태어나 성장한 개체들이었다. 전어는 내만의 수온이 8°C가 되기 전에 월동을 위하여 외해로 이동하는 것으로 알려져 있으나, 조사 해역에서는 외해로의 통로가 차단되어 이동하지 못한 것으로 추정된다.

밴댕이: 1995년 11월에 채집된 개체의 체장 범위는 88.0~138.0 mm로, 90~110 mm인 개체가 대부분을 차지하였고, 당년생들이었다(Fig. 3). 천수만의 경우 밴댕이는 외해에서 월동한 후 수온이 10°C 이상되면 전어보다 약간 늦게 내만으로 들어온다(Gil and Lee, 1986). 천수만의 경우 우점어류이며, 유어들은 가을에 월동하기 위하여 외해로 이동할 때까지 내만에 머물며, 당년에 태어난 밴댕이는 11월에 미차체장이 50~110 mm에 이르는 것으로 알려져 있다. 본 조사에서는 전장을 측정할 것을 고려하면 성장률이 비슷하였다. 전어와 마찬가지로 채집 때 수온이 8°C로, 외해로 이동할 때가 지났으나 통로가 차단되어 방조제 내부에 머무르고 있는 것으로 판단된다.

기타 어류: 위의 3종을 제외하고 호수 내에서 채집된 나머지 어류는 채집된 개체수가 적어, 평균체장, 표준편차 및 체장범위만을 Table 3에 정리하였다. 곤어리는 전어나 밴댕이와 유사한 생태를 보이는 어류로 체장 범위도 위의 2종과 유사하였다. 붕어는 비교적 체장 범위가 넓었으나 나머지 어류의 체장범위는 좁은 편이었다.

토 의

시화호 내에서 채집된 어종은 전어와 곤어리를 제외하고는 외부 해역에서 잡힌 종과 달랐다. 시화호 내에서 잡힌 어종은 천해성인 망둑어류, 연안회유성인 청어목어류 및 담수종인 붕어로 구성되었다. 이에 비하여 만 외부에는 5월에는 비교적 조립 퇴적물을 선호하는 어류가 주를 이루었고, 8월에는 회유성인 민태와 곤어리 및 내만성인 참서대가 비교적 많은 양이 채집되었다. 세립퇴적물이 우세한 서해 내만 해역의 저어류 군집은 참서대와 민태가 우점한다(이와 황, 1995; 이, 1996). 시화호 내부의 저질은 세립질로 5월에 외부 해역에서 잡힌 조립질을 선호하는 어류들은 서식하지 않는 것으로 추정된다. 그러나, 외부의 세립질을 우점하는 참서대나 민태가 같은 저어류가 세립 저

질임에도 불구하고 채집되지 않은 것은 시화호가 건설된 이후 저서 환경이 이들 저어류가 살기에는 부적합하였던 것으로 추정된다. 1995년 10월에 시화호 내 정점의 염분은 깊이가 5 m 이하인 곳에서는 10% 이하였고 5~6 m 이상에서는 20% 이상으로 층을 이루어(박 등, 1997), 염분만으로 볼 때 광염성인 해산어가 살 수 있는 환경을 이루었다. 그러나, 용존산소량은 표층에서는 포화 상태였으나 깊이 5~6 m를 경계로 낮아져 0.3~2.3 mg/l로, 포화농도는 3.8~27.9%를 나타내었고, NH₄ 농도가 2 mg/l 이상의 수질이 악화된 상태였다. 서해 내만에서 우점하는 참서대와 민태는 내만에서도 비교적 수심이 깊은 곳의 바닥에 사는 어류로, 앞으로 살펴 볼 암모니아의 독성 때문에 이들이 서식할 수 없는 환경이 조성된 것으로 보인다. 이에 비하여 출현한 망둑어류들은 참서대나 민태에 비하여 수심이 얇은 곳에 살고 낮은 염분에도 잘 견디고 친해 종들로, 깊은 곳보다는 염분은 낮았지만 수질 상태가 좋은 얇은 곳에 분포하였던 것으로 추정된다. 11월에 채집된 전어, 밴댕이 및 곤어리는 내만에서 산란하고 어린 시기를 보내는 어류들로 염분이 비교적 낮은 곳에서도 살 수 있는 어류이다. 이들은 부어류들로 저층의 수질이 나쁜 곳보다는 중층의 염분도 상대적으로 높고, 수질도 비교적 양호한 중층에 머물러 살아 남은 것으로 추정된다. 현지 어부들에 의하면 전어나 밴댕이가 한곳에 대량으로 몰려 있어 잡히는 경우가 있어, 시화호 내의 곳에 따라 일정 수준 이상의 염분과 수질을 유지하는 곳에 몰려 살아 남았을 가능성이 가장 크다. 붕어는 민물 어류 가운데 비교적 잔물에 잘 견디는 어류로, 수심이 5 m 이하인 얇은 곳은 붕어가 살 수 있는 10% 이하였었다.

1996년 3월에는 11월에 채집된 어류 중 3종을 제외하고는 채집되지 않았다. 1월과 2월 시화호는 빙결되었고, 3월이 되어 표층의 얼음이 녹았다. 전어, 멸치, 곤어리 및 밴댕이는 회유성으로 서해 연안에서 11월 말이면 월동을 위하여 외해로 이동하는 어류이다(Lee and Seok, 1984). 전어와 밴댕이는 수온 8~10°C 이상일 때 내만에 머물며, 수온이 그 이하로 낮아지면 외해로 이동하고(Lee, 1983; Gil and Lee, 1986), 수온 5°C 이하에서는 운동 저해 현상이 나타난다. 이 결과로 미루어 겨울 동안 시화호의 낮은 수온을 이 어류들은 견디지 못하고 동사한 것으로 추정된다. 1995년 11월에 채집된 어류의 연령 사정 결과 1995년에 부화한 당년생 개체들이 주를 이루었다. 이 결과는 1995년에도 시화호와 외해수의 교환이 있었음을 의미한다.

3월 이후 전 수층의 NH₃-N농도는 300 µm 이상으로 수질이 악화되었다(박 등, 1997). 이 결과 5월에는 풀망둑 3마리 만이 채집되어 대부분의 어류들이 악화된 수질을 견디지 못하고 폐사한 것으로 추정된다. 5월 채집 때 부패가 심한 풀망둑들이 채집된 것이 이를 증명한다. 3월 이후 수차에 걸쳐 수문을 열어 내부 시화호 물과 해수를 교환 시켜 표층 염분이 염분은 20% 내외, 저층은 외해와 염분이 비슷하여졌다. 이에 따라 수질이 약간 개선되었으나 크게 개선되지는 않았다. 시화호 물과 해수의 교환 과정에서 외해의 어류들이 시화호 내로 유입될 수도 있었다. 그러나, 5월에 풀망둑 3마리 만이 채집되어 외해 어류들이 유입되지 않은 것을 알 수 있다. 1995년 10월에 채집된 해산어류들은 0세군과 1세군이 혼재되어 이 시기까지는 시화호 물 교환 과정에서 해산 어류들이 유입되었다. 이 결과는 시화호 건설 후 악화된 폐수가 인근 해역으로 방류되면서 인근 해역 어류들이 도피하였음을 나타낸다. 그러나, 1996년 8월에는 두줄망둑과 구굴무치가 대량으로 채집되었다. 염분이 낮은 곳을 선호하는 이 어류들 만은 해수의 유입과정에서 시화호 내로 물려 들어온 것으로 보인다. 그러나, 본 8월 조사 후 일주일 후인 8월 중순 폐사한 것이 관찰되었다.

본 고찰에서는 다른 해역에 비하여 시화호의 암모니아 농도가 특히 높았기 때문에 암모니아를 중심으로 어류에 미치는 영향을 분석하였다. 물속의 암모니아는 산화되어 먼저 아질산염이 되고 결국 질산염으로 변형되지만, 암모니아 농도가 높아지면 성장률이 낮아지고 결국은 죽게 된다(Boyd, 1979; Stickney, 1979). 1996년 3월의 평균 암모니아 질소의 농도는 평균 5.04 mg/l이었으며, 높은 곳은 6.27 mg/l이었다(박 등, 1997). 암모니아의 반치사농도(LC50)는 어류에 따라 다르다. 광염성인 *Morone chrysops*와 *M. saxatilis*의 경우 염분에 관계 없이(1~25%) 암모니아 96-h LC50이 평균 0.70 mg/l이었으며(Weirich et al., 1993), *Sparus aurata* 유어의 경우 암모니아 농도 0.5~0.7 mg/l에서 성장 저해가 생기고 생산물도 낮아졌다(Wajsbrodt et al., 1993). 비교적 암모니아에 강한 새우 *Penaeus schmitti*의 경우 72시간의 치사농도가 2.01 mg/l였다(Arencibia et al., 1994). 시화호에서 채집된 어류에 대한 암모니아에 대한 정확한 치사농도는 조사된 자료가 없으나, 위의 결과로 미루어 어류의 생산에 영향을 주었을 것으로 판단된다.

암모니아의 어류에 대한 독성은 pH나 수온이 높아지거나 염분이 낮아지면 강하여 진다(Tomasso et al., 1980; Bergerhouse, 1993). 위에 인용한 *Morone* spp.의 경우 실험 때의 pH는 7~7.5이었다. 시화호의 pH는 3월에 평균 8.04에서 8월에는 8.18로 상승하였다. 시화호의 일차생산력이 최대 19,316 mgC/m²/day로(최 등, 1997), 연안의 대변식 때 보다 1,000배 이상 높아 이와 같은 높은 pH 값이 관찰되었다. 시화에서 암모니아 농도가 높은 상태에서 pH도 높아 어류에 대한 암모니아의 독성이 더 강하여진 것을 알 수 있다.

암모니아 뿐 아니라 아질산도 농도가 높으면 어류 혈액의 hemoglobin을 산화시켜 methenoglobin을 만들어 산소 결합 및 운반을 방해한다(Brown and McLeay, 1975; Wedemeyer and Yasutake, 1978). 해산 어류에서 염분이 증가하면 염소나 칼슘이 아가미에서 암모니아나 아질산염 흡수를 방해하여 암모니아나

아질산 이온에 대한 독성이 약화된다(Arabaster and Lloyd, 1980; Alemendras, 1987; Wise and Tomasso, 1989). 시화호의 내부 염분은 전반적으로 외해에 비하여 낮았기 때문에, 시화호 내의 해산 어류에 대한 암모니아나 아질산 이온의 독성이 외해 어류에 비하여 더 컸을 것이다.

수온이 높아지면 신진대사율이 높아져 암모니아 농도가 같아도 어류에 대한 독성은 강해진다(Konovets et al., 1993). 1996년 8월초 평균 수온은 24.9°C였고, 표층은 28°C 이상의 높은 값을 보였다. 이 시기에 바다에서 시화호로 들어 온 두줄망둑과 구굴무치들은 초기에는 수온이 낮은 곳에서 살아 남을 수 있었지만, 그 이후 수온이 상승하며 암모니아 등 악화된 수질의 영향이 증대하여 폐사한 것으로 보인다.

조사된 수층의 증금속 농도는 조사된 어류의 치사 농도보다 낮았지만(박 등, 1997) 퇴적물 내의 증금속 농도가 높아(한 등, 1997), 이들이 물리화학적 요인에 의하여 물속으로 확산 될 경우 어류에 상당한 영향을 줄 수도 있다. 실험실에서 생물에 미치는 영향 조사는 한 두 가지 요인에 대하여만 조사할 수 밖에 없다. 자연 상태에서 생물은 여러 요인의 복합적인 영향을 받으며, 생물에게 부정적인 요인은 복합적으로 작용하면 그 영향이 증폭되는 것이 일반적이다. 시화호의 경우, 수온이 낮았던 시기에 수도 수질은 어류가 살기에 부적합하였으나 일부 어류는 살 수 있었다. 그러나, 수온이 상승하고 pH도 높아지면서 암모니아의 독성이 상승 효과를 일으켜 더 이상 어류들이 살 수 없는 환경이 조성된 것으로 판단된다.

참고문헌

- 박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희. 1997. 시화호 산화-환원 환경 하의 용존 유·무기 화합물의 생지화학적 연구. 한국해양학회지 「바다」, 2(2): 53-68.
- 이태원. 1996. 천수만 어류의 종조성 변화 1. 저어류. 한국수산학회지, 29: 71-83.
- 이태원, 황선완. 1995. 아산만 저어류 IV. 종조성의 최근 3년간(1990-1993) 변화. 한국수산학회지, 28: 67-79.
- 임양재, 이태원. 1990. 대천해빈 쇠파대 어류군집의 계절변화. 한국해양학회지, 25: 135-144.
- 정문기. 1977. 한국어도보. 일지사. 서울.
- 최중기, 이은희, 노재훈, 허성희. 1997. 시화호와 시화호 주변 해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차생산력에 관한 연구. 한국해양학회지 「바다」, 2(2): 78-86.
- 한명우, 박용철, 허성희. 1997. 시화호에서 암모니아와 납의 저층 용출. 한국해양학회지 「바다」, 2(2): 69-77.
- Alemendras, J.M.E., 1987. Acute nitrite toxicity and methemoglobinemia in juvenile milkfish (*Chanos chanos*). *Aquaculture*, 61: 33-40.
- Arabaster, J.S. and R. Lloyd, 1980. Water Quality Criteria for Freshwater Fish. Butterworth, London.
- Arencibia, G., A. Martin, C. Sosa and A. Vivero, 1994. Preliminary results on the effect of ammonium on the postlarvae of *Penaeus schmitti*. *Rev. Latinoam. Aquicult.* 43: 4-9.
- Bergerhouse, D.I., 1993. Lethal effects of elevated pH and ammonia

- on early life stages of hybrid striped bass. *J. Appl. Aquacult.*, **2**: 81-100.
- Boyd, C.E., 1979. Water Quality in Warmwater Fish Ponds. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University, Auburn, Alabama.
- Brown, D.A. and D.J. McLeay, 1975. Effect of nitrate on methemoglobin and total hemoglobin of juvenile rainbow trout. *Pr. Fish-Culturist*, **37**: 36-38.
- Gil, J.W. and T.W. Lee, 1986. Reproductive ecology of the scaled sardine, *Sardinella zunasi* (Family Clupeidae), in Cheonsu Bay of the Yellow Sea, Korea. *Indo-Pacific Fish Biology* **2**: 818-829.
- Konovets, I.N., V.V. Grubinko, O.M. Arsan and V.A. Kulik, 1993. Effect of temperature to the functioning of adaptive ammonia detoxification systems in carp. *Gidrobiol. ZH.* **29**: 47-52.
- Lee, T.W., 1983. Age composition and reproductive period of shad, *Konosirus punctatus*, in Cheonsu Bay. *J. Oceanol. Soc. Kor.* **18**: 161-168.
- Lee, T.W. and K.J. Seok, 1984. Seasonal fluctuations in abundance and species composition of fishes in Cheonsu Bay using trap net catches. *J. Oceanol. Soc. Kor.* **19**: 217-227.
- Masuda, H., K. Amaoka C. Arago, T. Ueno and T. Yoshino, 1984. The Fishes of the Japanese Archipelago. Tokai Univ. Pr. Japan.
- Shannon, C.E. and W. Weaver, 1949. The Mathematical Theory of Communication. Univ. Illinois Pr.
- Stickney, R.R., 1979. Principles of Warm Water Aquaculture. Wiley, New York.
- Tomasso, J.R., C.A. Goudie, B.A. Simco and K.B. Davis, 1980. Effects of environmental pH and calcium on ammonia toxicity in channel catfish. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **109**: 229-234.
- Waysbrot, N., A. Gasith, A. Diamant and D.M. Popper, 1993. Chronic toxicity of ammonia to juvenile gilthead seabream, *Sparus aurata* and related histopathological effects. *J. Fish. Biol.*, **42**: 321-328.
- Wedemeyer, G.A. and W.T. Yasutake, 1978. Prevention and treatment of nitrate in juvenile steelhead trout (*Salmo gairdneri*). *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **35**: 822-827.
- Weirich, C.R., J.R. Tomasso and T.I.J. Smith, 1993. Toxicity of ammonia and nitrate to sunshine bass in selected environments. *J. Aquat. Animal Health* **5**: 64-72.
- Wise, D.J. and J.R. Tomasso, 1989. Acute toxicity of nitrite to red drum, *Sciaenops ocellatus*: effect of salinity. *J. World Aquacult. Soc.*, **20**: 193-198.