

## 안동 임하댐 유역의 지질과 임하호 고탁수의 원인

황상구\* · 정기영

안동대학교 지구환경과학과

## Geology in Drainage Field of the Imha Dam and Origins of High Turbid Water in the Imha Lake, Andong

Sang Koo Hwang\* and Gi Young Jeong

Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea

Imha lake has a high turbid water which keeps up during a few months, as comparing to other dams. Origins of the high turbid water derive from suspended materials which compose of micro particles of clay and rock-forming minerals. They are the weathered products from surface rocks that relate with particular geology in drainage field of the Imha dam. Accordingly we have fundamentally surveyed the kinds, properties, distribution and structures of general geology, found a few particular geology that source clay materials, and traced the passage that their weathered products enter the dam. We have suggested the basic origins of increase in turbid degree from detecting kinds and behavior of the suspended materials cause high turbid water in the Imha lake.

**Key words :** Imha lake, high turbid water, suspended materials, clay mineral, particular geology, weathered products

임하호는 다른 댐보다 고탁수 현상이 심하고 한번 탁수가 발생되면 수개월간 지속되는 양상을 보인다. 고탁수의 원인은 다양한 종류의 부유물질에 의한 것이며 이 부유물질은 미립의 점토광물과 조암광물 입자들이다. 이 미립자들은 홍수시 유수에 의해 떠내려 온 임하댐 유역의 암석 풍화물이며 유역일대의 특이한 지질과 밀접한 관계가 있다. 그러므로 근본적으로 임하댐 유역의 지질의 종류, 성질, 분포, 구조 등의 일반상태를 조사하고 이 가운데 점토를 공급하는 특이 지질을 찾아내어 탁도를 증가시키는 암석 풍화물이 임하호로 유입되는 경로를 조사하였다. 또한 임하호 내에서의 고탁수를 일으키는 부유물질의 종류와 거동상태를 감정함으로서 탁도 증가의 근본적인 원인을 제시하였다.

**주요어 :** 임하호, 고탁수, 부유물질, 점토광물, 특이 지질, 풍화물

### 1. 서 언

임하댐은 1991년 12월부터 담수된 이후로 여름철 우기를 거치면서 다른 댐보다 탁수현상이 심하고 한번 탁수가 발생되면 3개월간 지속되는 양상을 보인다. 따라서 겨울철 갈수기를 제외하고 거의 연중 탁수를 유지하며 상수원과 공업용수로서 많은 문제점 때문에 애물단지로 민원의 대상이 되고 국가적인 관심거리가 되었다. 그러므로 임하댐의 고탁수의 근본 원인이 무엇인지를 알아내서 그에 따른 대책을 세워야 한다.

홍수 후에 나타나는 고탁수의 원인은 다양한 종류의

고형 부유물질에 의한 것이며 이 고형 부유물질은 미립의 점토광물과 조암광물 입자들이다. 이 미립자들은 홍수시 유수에 의해 떠내려 온 임하댐 유역의 암석 풍화물이며 유역일대의 특이한 지질과 밀접한 관계가 있다. 그러므로 근본적으로 임하댐 유역의 전반적인 지질의 종류, 성질, 분포, 구조 등의 일반상태를 조사하고 이 가운데 탁도를 증가시키는 특이한 지질은 무엇인지를 알아낼 필요가 있다. 더불어 이러한 지질로부터 탁도를 증가시키는 암석 풍화물이 댐으로 유입되는 경로를 알아내야 한다.

고탁수에 대한 대책은 탁도를 증가시키는 다양한 부

\*Corresponding author: hwangsk@andong.ac.kr

유물질의 정확한 감정과 특성에 관한 정량적인 연구도 병행되어야만 한다. 이 부유물질들은 주로 임하댐 유역 암석의 풍화물인 미립의 점토광물과 조암광물의 입자로 구성되어 있는 것으로 추정된다. 특히 점토광물들은 극미립으로 산출되어 광물에 따라 각기 다른 콜로이드 성질을 갖고 있어서 물의 탁도에 영향을 미친다. 따라서 임하댐에서 탁수를 유발시키는 직접적인 원인으로서 다양한 부유물질, 특히 세립의 점토광물의 종류, 형태, 조성, 물리적 특성에 관한 정확하고 자세한 연구가 요구된다.

이들에 대한 자세한 연구를 위해서 지표지질조사, 편광현미경관찰, 지질구조분석, X선희철(XRD), 투과전자현미경(TEM), 유도결합플라즈마(ICP) 분석 등의 연구를 수행한 바 있다. 이러한 연구결과를 종합하여 탁수를 유발시키는 주요 지질은 무엇이며 이 지질의 분포, 성질, 상태를 파악하고 이들의 풍화물이 임하호로 유입되는 경로를 추적하고 또한 호수 내에서의 탁도를 증가시키는 부유물질의 종류와 거동상태를 감정함으로서 탁도 증가에 대한 근본적인 원인을 제시한다.

## 2. 기 상

임하댐 유역은 안동시, 영양군과 청송군이 포함되는 지역이다. 이 유역은 연평균 기온이  $11.6^{\circ}\text{C}$ , 연간 강수량이 1,034.9 mm이고, 연간 중발량이 1,085.2 mm, 연평균 상대습도가 71%이며, 연평균 풍속이 1.8 m/sec를 나타낸다(Table 1).

이 유역의 평균기온은  $11.6^{\circ}\text{C}$ 이고 8월에  $25.0^{\circ}\text{C}$ 로 최고기온을 나타내며 최저기온은 1월에  $-2.8^{\circ}\text{C}$ 로 나타나 연평균 기온차가  $31.9^{\circ}\text{C}$ 인 것으로 조사되었다. 기

온의 월별변화는 계절의 차이를 매우 뚜렷하게 나타낸다. 이 뚜렷한 기온 차이는 암석의 기계적 풍화에 상당한 영향을 미친 것으로 짐작된다.

이 유역의 강수량을 보면 여름철인 6~9월 사이의 우수기에 남태평양 기단의 영향으로 고온다습한 기후가 형성되어 연간 강수량 1,034.4 mm중 67.6%에 해당하는 698.8 mm가 집중되는 반면 한랭한 북서계절풍의 영향을 받는 겨울철 12~2월 사이의 건조기 강수량은 연간 강수량의 7.2%에 해당하는 74.3 mm에 불과하여 계절적으로 현저한 차를 보이고 있다. 우수기 중에서도 7월에 가장 집중되어 247.1 mm가 내림으로서 흔히 홍수를 유발하며 이때 막대한 양의 토사가 하천에 유입되어 탁도를 증가시킨 것으로 짐작된다.

증발량은 5월에 150.6 mm로 최대치를 나타내고 12월에 41.9 mm로 최저치를 보이며 1~6월, 10~12월은 증발량이 강수량보다 많고 7, 8, 9월은 강수량이 증발량보다 많은 것으로 조사되었다. 그러므로 7, 8, 9월이 암석의 화학적 풍화를 가장 심하게 일으키는 시기이고 또한 템수위를 상승시키고 탁도 상승이 가장 큰 시기라고 볼 수 있다.

최근 천기일수는 맑은 날이 97일, 흐린 날이 107일, 결빙일은 121일, 서리는 85일, 안개일수는 66일, 눈이 17일로 조사되었다. 여기서 연중 1/3이 결빙일인 것은 암석의 기계적 풍화를 촉진시키는데 큰 영향을 미친 것으로 생각된다.

## 3. 지형과 수계

임하댐은 안동시 임하면 임하리와 임동면 망천리의 경계부에서 동서방향으로 흐르는 반변천 중류를 남북

Table 1. General weather conditions during a decade(Weather Station).

Monthly	Monthly temperature( $^{\circ}\text{C}$ )			Rainfall or snowfall (mm)	Evaporation (mm)	Relative humidity (%)	Sunshine duration (hr)	Wind velocity (m/sec)
	Mean	Mean in maximum	Mean in minimum					
1	-2.8	3.0	-7.7	22.7	42.6	64	182.9	2.1
2	-0.6	5.1	-5.3	33.2	47.0	64	170.9	2.3
3	4.8	11.0	-0.6	46.7	75.4	65	194.9	2.2
4	12.0	19.3	5.1	69.9	120.8	60	225.2	2.2
5	17.0	23.9	10.4	73.1	150.6	65	243.6	1.9
6	21.2	27.2	15.6	130.8	139.2	74	200.4	1.7
7	24.1	29.0	20.5	247.1	114.8	83	152.5	1.5
8	25.0	30.2	20.9	168.3	133.7	80	185.4	1.5
9	19.6	24.9	15.4	152.6	89.1	81	149.7	1.4
10	12.7	20.0	7.1	37.9	78.5	75	186.0	1.5
11	5.8	12.5	0.3	34.3	51.6	71	167.2	1.8
12	0.0	6.0	-5.0	18.2	41.9	68	165.4	2.0
Yearly	11.6	17.7	6.4	1034.4	1084.8	71	2223.6	1.8

방향으로 막은 댐이다. 이 임하댐의 유역은 안동시 동부, 영양군과 청송군의 거의 전부를 포함하는 곳이다 (Fig. 1). 동쪽 경계는 태백산맥 남부의 낙동정맥이 분수령을 이룬 곳이다. 즉 칠보산 남쪽의 853고지로부터 삿갓봉-백암산(1004 m)-삼승령-웃재-울치재-명동산(812 m)-황장재-대둔산(905 m)-며구등-명동재-우설령-꾀나무재-통점재-723고지로 이어지는 낙동정맥의 분수령 서부이다. 북서쪽 경계는 853고지-동화재-덕산봉-논골재-장갈령-벳터제를 거쳐 댐으로 연결되는 분수령 남동부이고, 남서쪽 경계는 723고지-구암산(807 m)-삼자현-솔치재-아홉실재-사일산(649 m)-양곡재-약산(583 m)를

거쳐 댐으로 연결되는 분수령 북동부이다.

태백산맥은 울진군, 영양군, 봉화군의 3개군의 접경 지역 근처의 칠보산(974 m)으로부터 크게 두 갈래로 분기되어 남쪽으로 거의 평행하게 달린다 (Fig. 1). 이 평행한 두 산맥 사이의 일월산 북동부에서 반면천이 발원하여 남쪽으로 흐르고 구암산 남동부에서 용전천이 발원하여 북쪽으로 흐른다. 이 반면천의 상류는 남북방향 단층의 지배를 받으며 하류는 북서-남동 내지 동서방향 단층의 영향을 받고 있다.

임하댐 유역의 수계는 대체로 남북 방향이 주류를 이루며, 동서방향의 임하호를 경계로 하여 북반부의 반



**Fig. 1.** Map of water system in drainage field of the Imha dam, showing locations drawing turbid waters and measuring their turbidity.

변천과 남반부의 용전천 수계로 나누어진다. 지류들은 남북방향의 반변천과 용전천을 중심으로 여러 갈래로 갈라지며 전체적으로 수지상을 이루고 지형과 거의 일치되어 곳에 따라 심한 곡류현상을 나타내기도 한다.

반변천은 일월산 북동부 근처에서 발원하여 남쪽으로 진보까지 흘러들며, 진보 부근에서 서쪽으로 흘러 안동에서 낙동강에 합류된다. 반변천의 지류는 가장 남쪽부터 서쪽으로 흐르는 서시천, 화매천, 남쪽으로 흐르는 동천, 장군천, 서쪽으로 유입하는 장파천 등이 있다.

용전천은 구암산 남동부에서 발원하여 북쪽으로 청송을 거쳐 청송군의 북서 경계부 지리에서 반변천에 합류된다. 용전천도 여러 지류를 거느리며 이들 가운데 신기천, 괴천, 주방천, 주산천, 마평천, 용두천, 노부천 등의 7개 지류는 동쪽 분수령에서 발원한다. 신기천은 이 지류 가운데 가장 북쪽 지류이고 차례로 남쪽으로 괴천, 주방천과 주산천이 분기된다. 이 지류들은 대부분 주왕산 국립공원에서 발원하여 서쪽으로 흐른다.

#### 4. 유역의 지질

임하댐 유역의 지질은 층서별로 구분하면 대체로 선캄브리아기 변성암류, 쥬라기 화성암류, 백악기 하양층군, 유천층군, 제3기 관입암류로 나눌 수 있다(Fig. 2).

백악기 하양층군과 유천층군은 본 유역에서 가장 넓게 분포된다. 이들은 임하호를 경계로 하여 대체로 북반부는 영양소분지 남부에 해당되고 남반부는 의성소분지 북동부에 해당된다. 이들은 변성암류와 화성암류를 부정합으로 덮거나 혹은 이들과 단층접촉을 하고 있다.

제3기 관입암류는 화강암과 규장암(혹은 유문암)으로 구성된다. 이중 화강암은 여러 곳에서 백악기 하양층군의 퇴적암류를 작은 암주상으로 관입하여 주위를 열변성시켰으며, 규장암은 유역 중부에서 백악기 암석들을 관입하고 있다.

##### 4.1. 선캄브리아기 변성암류

유역의 선캄브리아기 변성암류는 편마암, 석회질 편암 및 대리암, 각섬암 등으로 대분된다(황상구, 1992). 이들은 유역의 서부, 동부와 북부에 소규모로 노출된다.

**편마암:** 유역의 서부, 동부, 최북단에 소규모로 노출되며, 이 편마암은 석회질 편암 및 대리암, 각섬암 등이 협재되어 있으며 쥬라기 화강암에 의해 관입되어 있다.

이 편마암은 대체로 호상 편마암과 화강암질 편마암

으로 구성되며 서로 점이적인 변화를 나타낸다. 호상 편마암의 입도는 세립질 내지 중립질이며, 고철질대가 대부분 흑운모와 소량의 각섬석과 백운모, 견운모 등으로 구성되어 있고 규장질대는 대부분 석영, 사장석, K장석 등으로 구성된다. 화강암질 편마암은 일반적으로 중립질로서 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모 등으로 구성되며 외관상 중립질 화강암과 유사하나 흔히 이질 잔류체가 발견된다.

**석회질 편암 및 대리암:** 유역 서부에 분포되고 여러 곳에 소규모로 분포된다. 이와 같은 분리 분포는 화강암화작용의 영향인 것으로 보인다.

석회질 편암은 대부분 회백색을 띠며 간혹 담황록색을 띠는 것도 있다. 대부분 규질대와 석회질대가 1~2cm 내외 간격으로 교호되어 있으며 풍화면에서 뚜렷한 층상구조를 보여주며 노두에서 소습곡구조가 잘 인지된다.

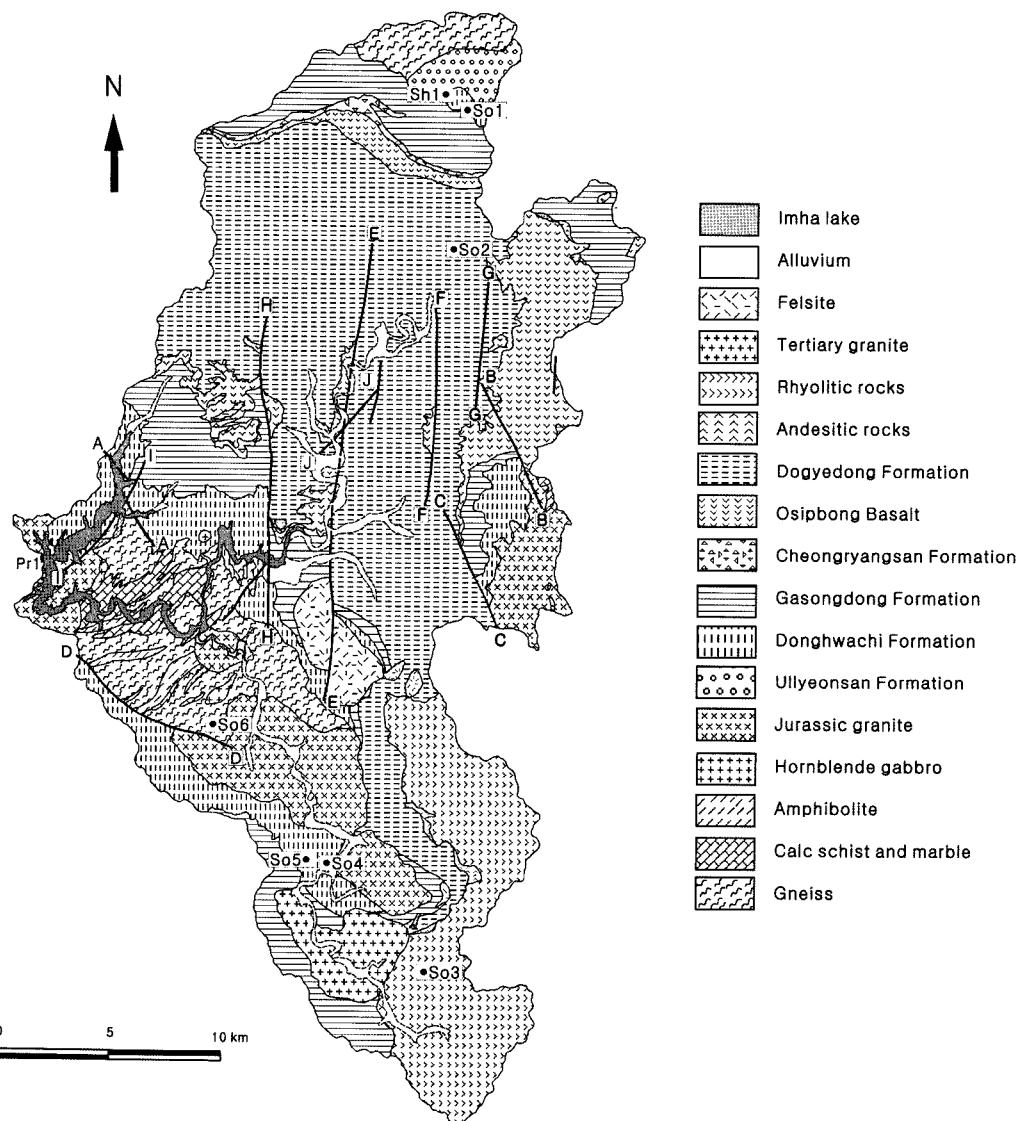
대리암은 석회질 편암 내에 협재되어 있거나 부단으로 남아 있다. 이는 대체로 회백색 내지 유백색을 띠며 풍화면에서 특히 회색 내지 암회색을 띤다. 대부분 조립질이어서 방해석 결정이 쉽게 관찰되며 드물게 석영 입자가 함유되어 있어 풍화면에서 돌출되어 있고 간혹 흑연 입자가 관찰된다.

**각섬암:** 반변천의 남쪽에 대부분 분포되며 입도에 따라 세립질과 중립질로 나뉘어진다. 세립질 각섬암은 아주 적은 규모로 석회질 편암에 협재되거나 인접되어 있으며, 엽리가 주변 지질과 평행하게 발달된다. 중립질 각섬암은 북동-남서방향으로 비교적 큰 규모로 대상 분포를 하며, 대부분 화강암질 편마암 내에 분포되어 있다. 각섬암은 아주 어두운 암록색을 띠며 대개 엽리와 선구조가 잘 발달되어 있다. 이는 대부분의 각섬석, 사장석, 소량의 흑운모, 휘석 등으로 구성된다.

##### 4.2. 쥬라기 화성암류

유역의 쥬라기 화성암류는 각섬석 반려암, 쥬라기 화강암으로 구분된다(Fig. 2). 이들은 선캄브리아기 변성암류를 관입하고 백악기 퇴적암류에 의해 파복된다.

**쥬라기 화강암:** 이 유역에서 영덕화강암체(하타에, 1936), 청송화강암체(이홍규와 홍승호, 1973)와 임하화강암체가 있다(황상구, 2002). 이 가운데 영덕화강암체는 유역 동부에 분포되고 동쪽으로 넓게 연장된다. 청송화강암체는 유역 중남부에 노출되고 임하화강암체는 유역 서부에 크게 노출되어 북서쪽으로 넓게 연장되며,  $166.2 \pm 3.2$  Ma 연대를 가진다(황상구, 2002). 이 화강암은 모두 대체로 담회색을 띠며 약한 풍화면에서 담홍색



**Fig. 2.** Geological map in drainage field of the Imha dam, showing locations sampling soils and a parent rock. A, Jungpyeong fault; B, Jusan fault; C, Taekjeon fault; D, Andong fault; E, Hupyeong fault; F, Sogye fault; G, Secheon fault; H, Cheongok fault; I, Imdong fault; J, Gamcheon fault.

을 띠며, 석영, K장석, 사장석, 흑운모 등으로 구성되고 곳에 따라 각섬석이 함유되어 있는 경우도 있다.

각섬석 반려암: 임하화강암체의 동변부에 대상으로 분포하며,  $128.6 \pm 2.5$  Ma 연대를 가진다(황상구, 2002). 본암은 암회색이며 약한 풍화면에서 암록색이고 심한 풍화면에서 적갈색을 나타낸다. 입도는 대체로 중립질이고 간혹 조립질인 곳도 있다. 구성광물은 각섬석, 사장석 등으로 구성된다.

#### 4.3. 백악기 하양층군

백악기 하양층군은 유역 북반부의 거의 전역에 분포되어 영양소분지를 넓게 차지한다. 영양소분지에서 적색 계통 지층이 많고 중부에 녹색 계통 지층과 현무암 층이 혼재되어 있어 구분된다. 하양층군은 하부로부터 울련산층, 동화치층, 가송동층, 청량산역암층, 오십봉현무암층과 도계동층 순으로 구분된다(김옥준 외, 1963; 이대성과 이하영, 1963; 김상육과 박봉순, 1970; 김남장 외, 1970).

**울련산층:** 백악기 하양층군의 기저역암층으로서 유역 북부에서 편마암을 피복하면서 노출된다. 이 층은 주로 역암들로 구성되어 있으나 적갈색층과 인접하는 상부에서는 알코스 사암과 적갈색 세일이 자주 협재된다.

역의 크기는 그 입경이 2~300 cm에 달하며 10~20 cm가 우세한 편이다. 이 역의 크기는 상부로 갈수록 작아진다. 역의 종류는 규암, 여러 암질의 화강암과 편마암, 대리암, 각섬암, 편암, 맥석영 등이다. 기질은 석영, 장석과 작은 역들로 구성되어 있어 대체로 알코스 질에 해당된다.

**동화치층:** 유역 북부에서 울련산역암층 상위에 놓이거나 변성암류와 쥐라기 화강암 등을 피복한다. 유역에서 총후가 곳에 따라 상당한 차이를 보이나 130 m 내외이다.

이 층은 대부분 적갈색을 띠며 하부에서 담홍색 사암과 역암이 우세하고 상부에서 적갈색 세일이 우세하다. 입도는 점토립에서 사립에 해당되며 고결도가 다른 퇴적암에 비해 약하다. 세일은 주로 점토광물과 녹니석으로 구성되고 방해석과 적철석으로 혼탁되어 있다. 사암은 장석을 많이 포함하여 알코스 사암에 해당된다. 알코스 사암은 주로 장석과 석영 입자로 구성되며 이 입자들 사이에는 주로 방해석, 자철석으로 오염된 점토광물과 녹니석 등으로 채워져 있다. 이들은 대부분 탁수의 원인 물질로 유수에 쉽게 이동되어 탁류를 일으킨다.

**가송동층:** 유역 북부, 동부, 중서부와 남서부에 격리되어 분포한다. 두께는 유역 중서부에서 250 m로 추정되고 동부에서 270 m로 측정된다.

이 층은 주로 세일과 사암의 호층으로 구성되며 드물게 역암 및 이회암층을 협재한다. 이들은 대부분 녹회색을 띠며 세일이 가장 우세하다. 세일은 주로 녹니석과 약간의 점토광물을 구성된다. 사암은 주로 알코스 사암이 흔한 편이며 응회질 사암도 상부로 가면서 자주 협재된다. 이들은 다른 퇴적암류에 비하여 고결도가 높으며 쉽게 풍화되지 않는다.

**청량산역암층:** 유역 북부, 북동부에 주로 분포된다. 두께는 유역 북부에서 최고 150 m로서 가장 두껍게 노출되고 측방으로 점차 얇아진다.

이 층은 주로 역암으로 구성되며 역질 사암, 사암 및 이암을 협재한다. 역암은 주로 담회녹색을 띠우며 기질은 알코스 혹은 응회질 물질로 채워져 있다. 역종은 주로 현무암, 규암, 화강암, 사암, 편마암 등으로 구성된다. 역의 크기는 최대 직경 25~30cm이고 평균 5~16cm이며 곳에 따라 평균 3~5cm로 작아진다.

**오십봉현무암층:** 유역 동부에 가장 넓게 분포하며 유역 북부와 중앙부에 분포한다. 두께는 동부 지역에서 최고 700 m이며 서부 지역에서 100 m 내외이다.

이 암층은 주로 현무암 용암류로 구성되고 퇴적암층이 협재된다. 용암류는 하부에서 우세하며 상부로 가면서 두께가 점차 얇아진다. 퇴적암층은 역암, 사암, 세일 등으로 구성되며 상부로 가면서 두께가 증가한다. 각 용암류는 기저부와 상단부가 유리질이고 흔히 행인상 구조를 가지며, 중간부는 장경 5 mm 내외의 장석 반정을 흔히 가진다.

현무암은 전반적으로 암갈색을 띠며 휘석, 사장석과 감람석 반정을 함유한다. 기공은 산화철, 녹니석, 옥수, 불석과 방해석 등으로 채워져 행인상 구조를 이룬다. 감람석은 사문석, 녹니석, 이딩사이트 등으로 교대되어 있으며, 휘석은 녹니석화되어 있다.

**도계동층:** 유역의 퇴적암류 중에서 최상위층이며 유역 중앙부에 가장 광범한 분포를 보인다. 두께는 약 550 m로 측정된다.

이 층은 저색 내지 저회색을 띠며 주로 세일과 사암, 응회질 사암이 호층을 이루고 역암, 역질 사암, 현무암을 협재한다.

세일이 가장 우세하며 고결도가 다른 암석에 비해 약하다. 이는 주로 점토광물과 녹니석으로 구성되고 방해석과 적철석으로 혼탁되어 있으며, 대부분 탁수의 원인 물질로 유수에 쉽게 유입되어 탁류를 발생시킨다.

#### 4.4. 유천층군

**유천층군** 화산암류는 유역 동부와 남부에 분포하며 안산암질암류와 유문암질암류로 구분된다.

**안산암질암류:** 작은 대상으로 분포하며 도계동층 상위에 놓이고 유문암질암류에 의해 피복된다. 이 암류는 안산암질 용암과 응회암으로 구성되며 암록회색 내지 암갈색을 띠고 사장석과 휘석 등의 반정을 갖는다. 또한 드물게 기공이 방해석, 녹니석, 옥수 등으로 채워진 행인상 구조를 형성하기도 한다.

**유문암질암류:** 유역 남동부 주왕산 국립공원으로부터 구암산 지역에 험준한 산세를 이루면서 크게 분포한다.

이 암류는 대부분 유문암질 회류응회암으로 구성되며 하부에 회록색 세일, 사암과 쳐트가 협재되고 중부에 얇은 안산암질 용암류가 협재되어 여러 층서단위로 나눠진다. 회류응회암 중의 무포산응회암은  $63.6 \pm 3.4$  Ma 연대(황상구와 김상호, 2006)를, 구암산응회암이  $56 \pm 11$  Ma 연대를 가진다(황상구, 2002).

회류응회암의 각 단위마다 기저부로 갈수록 암편의 산출빈도가 우세하고 중간부와 상층부로 갈수록 부석이 많아진다. 이 회류응회암은 유문암질 내지 데사이트질 성분이며 반정으로 석영과 사장석이 흔하게 나타난다.

#### 4.5. 제3기 관입암류

이 유역에서 이전 암층을 관입하는 화성암류는 제3기 화강암과 규장암 등이 있다.

**제3기 화강암:** 유역 남부에 큰 암주로 노출되고, 중부에서 작은 암주 모양으로 노출된다(Fig. 2). 이들은 하위 층군의 퇴적암류를 관입하여 주위를 규질화시켰다. 이로 인해 주변이 혼펠스화되어 풍화에 강한 암질로 남아 있다. 본암은 회백색을 띠며 중립질로서 대부분 장석과 석영으로 구성되며 흑운모와 각섬석이 드물게 나타난다.

**규장암:** 유역 중앙부에 암경, 암맥으로 산출되고 단층에 의해 남북 방향으로 절단되어 있다. 또한 유역 남동부에도 북동-남서 방향의 암맥으로 발달된다. 본암은 유문암에 속하며 주로 석영, 장석으로 구성되고 흑운모, 백운모, 각섬석 등이 소량 수반된다.

#### 4.6. 충적층

충적층은 수계를 따라 평지와 좁은 골짜기에 분포한다. 평지의 충적층은 대개 농경지로 이용된다.

이 충적층은 그 두께가 2~3 m 이내이고 주로 자갈, 모래, 점토 등으로 구성된다. 이들 구성물은 북쪽 반변천과 남쪽 용전천에 따라 크게 다르다. 자갈은 반변천 상류에서는 주로 현무암과 사암 등으로 구성되고 용전천에서는 응회암, 사암, 화강암, 편마암 등으로 구성된다. 모래는 반변천 상류에서 주로 역시 현무암과 사암 등으로 구성되나 그 구성량은 월등히 적은 편이며 용전천은 석영이 주이고 사암, 응회암이 많은 편이다. 점토는 반변천 상류에서 훨씬 많고 하상에 깔려 있는 자갈을 흔히 코팅하고 있는 것이 특징적이다.

### 5. 지질구조 분석

임하댐 유역에서 지질구조는 탁류 유발과 관련된 것으로서 분지와 관입, 그리고 단층 등을 생각할 수 있다.

#### 5.1. 퇴적분지

유역의 중앙부와 북반부는 중심지를 향하여 기울어지는 얕은 향심구조를 보여 주는 영양소분지를 형성한다. 따라서 유역 북반부에서 영양소분지를 중심으로 광

범한 도계동층의 분포면적을 갖게 하고 영양소분지 외곽에서 이의 하위 암층이 노출된다. 이와 달리 분지 중앙부 여러 곳에서 하위의 현무암이 소규모로 노출되는 것은 남북 방향의 계단단층에 기인한다.

그러므로 임하호 탁수의 원인으로서 반변천 탁류는 이의 상류에서 도계동층의 영향을 가장 크게 받을 것 이고, 이의 중류에서 동화치층과 가송동층의 영향을 심하게 받을 것으로 생각된다.

#### 5.2. 화성관입체

이 유역에서 노출되는 화성관입체는 백악기 화강암과 규장암이 있다. 이들은 대체로 퇴적암류 분포지역을 관입하였다. 화강암은 주위 퇴적암류를 다소 강한 접촉변성으로 혼펠스화시켰으나 규장암은 접촉변성의 정도가 미약하다. 그러므로 화성관입체 주위의 퇴적암류는 접촉변성에 의한 혼펠스화로 인하여 다른 퇴적암류에 비하여 풍화에 상당히 강한 편이다.

#### 5.3. 단층

이 유역에서 단층들은 방향성과 발달순서에 따라 북서-남동방향 단층계, 남북방향 단층계와 북동-남서방향 단층계의 세 방향이 우세하다. 이들 모두는 퇴적암류와 화성암류를 절단하고 있다.

북서-남동방향 단층계는 유역 서부와 동부에 4조가 발달된다. 이 단층계에는 안동단층과 중평단층(김남장 외, 1970), 주산단층과 택전단층이 있다(김상우과 박봉순, 1970). 이들의 방향성은 N30°~50°W이며(Fig. 2) 이의 연장성에 비해 전단대가 비교적 크게 발달되는 경향을 나타낸다.

남북방향 단층계는 유역 중부에 거의 같은 간격으로 평행하게 4조 이상이 발견된다(Fig. 2). 이 단층계에는 서쪽으로부터 차례로 천곡단층, 후평단층, 소계단층, 세천단층 등이 있다(김상우과 박봉순, 1970). 이들의 방향성은 N0°~10°E이며 이의 경사는 거의 수직이다.

북동-남서방향 단층계는 유역 서부와 중북부에 소규모로 발달되어 있다. 이 단층계에는 임동단층, 감천단층과 기타 소규모 단층이 있으며 유역에서 가장 규모가 작다(Fig. 2). 이 단층계의 방향성은 N30°~40°E이며 경사는 거의 수직이다.

유역에서 절리계도 이들 단열계에 일치하는 방향성을 나타내는 것으로 생각된다. 그러므로 유역의 수계도 이 3가지 단층계와 절리계에 지배되어 이들에 대체로 일치하는 경향을 보인다. 즉 유역의 북반부에서 남북방향의 단층계 특히 후평단층에 지배되어 반변천의

중류가 남북방향으로 흐르고 이의 지류들이 남서방향으로 혹은 남동방향으로 흐르는 것으로 생각된다. 그리고 유역의 남반부에서 북서-남동방향 특히 안동단층의 영향과 남북방향의 절리계에 지배되어 용전천이 북북서 방향으로 흐르고 이의 지류들도 대체로 북서방향으로 혹은 북동방향으로 발달되어 있음을 관찰할 수 있다. 또한 이 단층계는 점토광물을 다양으로 함유한 퇴적암류가 분포되는 곳에 주로 발달되어 있어 이들의 풍화속도를 빠르게 함으로서 탁류를 발생시키는 원인이 되는 것으로 생각된다.

## 6. 지질조건과 탁수의 관계분석

우리나라 대부분 호수는 우기에 탁수가 발생하는 것이 보통이며 탁수의 부유물질이 단시일 내에 가라앉아 사라지는 것이 일반적이다. 그러나 임하호는 어느 땜에서도 보다 탁수발생의 빈도가 갖고 탁도가 높으며 한번 탁수가 발생하면 그 지속기간이 오랫동안 유지되는 것이 특징적이다. 이는 탁수에 존재하는 부유물질이 대부분 미세한 점토광물이기 때문이다. 이 점토광물은 매우 미세하고 한번 발생할 때 다량 유입되기 때문에 이들이 가라앉는데 매우 긴 시간이 필요하다. 이 점토광물이 가라앉는 속도가 느린 이유는 임하호 내의 물이 다른 땅에서보다 특히 다르거나 땅의 구조가 달라서 그런 것이 아니다. 그러면 왜 임하호의 탁수는 미세한 점토광물로 구성되고 이들이 다량인지 그 원인을 찾아내는 것이 가장 필수적이다. 점토광물은 임하호 내에서 발생되는 것이 아니고 땅 유역에서 유입되는 것이다. 그러므로 점토광물이 임하호에 다량으로 유입되는 것은 임하댐 유역의 지질조건과 밀접히 관계되어 있을 것이다. 따라서 유역의 지질조건을 분석해야만 탁수를 유발하는 근본원인을 알아낼 수 있다.

탁도를 증가시키는 부유물질은 전술한 바와 같이 점토광물이다. 이 점토광물을 유발하는 지질은 유역에서 석회암을 제외하고 모든 지질이 해당된다. 이들은 풍화에 의해 점토광물을 쉽게 형성할 수 있는 장석류를 포함하기 때문이다. 그러나 이러한 과정에는 상당한 시간과 풍화가 빨리 일어날 수 있는 조건이 필요하다. 그러므로 점토광물을 쉽게 유발할 수 있는 지질은 점토광물을 포함하고 있는 퇴적암류가 높은 가능성을 가진다. 또한 같은 퇴적암류라 할지라도 석영이나 암연을 포함하지 않는 세일이 가장 높은 가능성을 지닌다. 왜냐하면 세일은 석영이나 암연을 거의 포함하지 않는 대신 점토광물을 다량 포함하고 방해석과 같은 시멘트

물질로 고결되어 있을 뿐만 아니라 고결도가 약하므로 쉽게 풍화될 수 있기 때문이다. 방해석은 풍화과정 중에 벳물에 의해 용해되어 달아나므로 점토광물을 포함하는 입자들이 서로 떨어져 이동할 수 있는 상태에 놓 이게 한다. 그렇다면 세일은 시멘트물질로서 방해석을 함유하면서 고결도가 낮다면 더 쉽게 개별 점토광물로 분리될 수 있을 것이다. 왜냐하면 고결도가 큰 세일은 방해석이 아주 적을 뿐만 아니라 고결과정 중에 점토광물은 초기 운모류로 변했을 것이고 또한 강한 고결로 인한 암석강도가 높기 때문에 쉽게 화학적 풍화가 일어날 수 없어서 점토광물로 쉽게 분리될 수 없기 때문이다.

그러면 유역의 지질 중에서 주로 세일로 구성되어 있는 것은 동화치층, 가송동층과 도계동층이다. 이 가운데 고결도가 낮은 암층은 동화치층과 도계동층이고 가송동층은 두 전자보다 고결도가 높은 강한 암층이다. 그러나 이들의 강도는 화성관입체와 단층 등의 다른 지질조건에 의해 달라진다. 즉 고결도가 낮은 동화치층과 도계동층일지라도 화성암체의 관입에 의하여 주위가 접촉열변성에 의해 혼펠스화됨으로서 강한 암석이 된다. 특히 유역 남부의 화강암의 관입에 의해 주위의 퇴적암류는 심하게 혼펠스화되어 강한 암석이 되어있다. 그러므로 용전천 유역의 퇴적암류는 탁도 증가의 요소가 상당히 줄었다고 생각할 수 있다.

한편 단층은 기계적 풍화를 쉽게 하는 요인이다. 단층이 발달하는 지역은 이에 부수적으로 무수한 절리가 더 잘 발달된다. 영양을 중심으로 유역 중북부는 남북방향, 북서-남동방향, 북동-남서방향의 단층계가 발달되어 있다(Fig. 2). 이러한 단층들과 절리들에 의해 고결이 덜 된 도계동층과 동화치층은 쉽게 잘게 조각화되고 이내 점토화될 것이다. 그러므로 이곳은 이 단층들과 이에 부수되는 무수한 절리들에 의해 기계적 풍화가 다른 곳보다 쉽게 일어난다. 이 기계적 풍화는 화학적 풍화에 연결되어 유역 중북부에 분포되는 도계동층과 동화치층의 점토화 과정에 일익을 담당하였을 것이다. 지표에서 풍화된 점토는 아주 미세하므로 벳물에 의해 유수가 발생하면 금방 쓸려 내려와 붉은 황토색 고탁류를 발생시키며 이는 지류로 흘러들어 반변천에 유입된다.

## 7. 탁류의 경로

임하댐 상류지역에서 탁수시료 채취는 약 40 mm의 비가 내려 탁류가 발생할 때 실시하였다. 당시의 유입

량은 용전천이 4CMS, 반변천은 14CMS였다. 먼저 댐에서 시작하여 수상에서 반변천과 용전천의 합류점(JBY)까지를 조사하였고 육상에서 반변천과 용전천을 거슬러 올라가며 탁수 유입현황을 조사하였다. 수상조사 결과 JBY 합류점에서 상류로부터 탁수가 유입되었으며, 육상조사에서 반변천과 용전천은 서로 뚜렷한 탁도 차이가 관찰되었다. 부곡에서 관찰된 탁도는 JBY 합류점으로부터 하류 1km 지점에서 채취한 임하호의 탁도와 거의 같아서 강바닥을 전혀 관찰할 수 없을 정도였으나 용전천은 강바닥이 명확히 보일 정도로 맑았다. 비록 탁수 발생후 24시간이 지난 시점이었으나 이 두 하천에서 뚜렷한 탁도의 차이로부터 탁수는 주로 반변천 상류인 영양 지역에서 발생하여 유입되고 있음을 알 수 있었다. 이에 따라 반변천의 탁수 유입 상황을 파악하기 위하여 부곡교에서 상류로 일월산 기슭까지 집중적인 조사를 행하였다. 부곡교의 탁도가 가장 높았으며 상류일수록 탁도가 감소하여 서서히 맑아졌으나 이는 시간적으로 초기의 고탁수가 이미 하류로 흘러갔기 때문으로 특별히 하류 일원에 탁수 발생요인이 큰 것으로 보이지는 않았다. 이는 다음날 조사에서 부곡교 일원의 탁도가 상당히 감소하였으나 상대적인 탁도가 여전히 상류일수록 감소하는 경향에서도 확인 할 수 있었다. 반변천 지류들의 현장조사 결과 동천 및 화매천의 물은 상당히 맑은 상태를 유지하고 있었으며 하상의 자갈도 흡착된 점토의 양이 적어서 매우 깨끗하였다. 그러나 입암 근처 동천과 반변천 본류의 합류점에서 반변천은 동천보다 탁도가 높았으며 하상의 자갈에 많은 점토가 흡착되어 있어서 반변천 본류가 탁수의 주요 유입 경로이며 탁수는 적어도 반변천 본류 유역에서 발생하였음을 추정할 수 있었다. 유역 북반부 영양지역에서 채취한 하천수의 탁도 측정 결과는 Table 2와 같다.

## 8. 탁수 부유물질 분석

### 8.1. 시료채취

탁수의 원인은 다양한 종류의 고형 부유물질들이며 이들은 주로 임하댐 유역 내에 분포하는 암석의 풍화물인 미립의 점토광물과 조암광물, 그리고 미량의 유기물로 구성되어 있는 것으로 추정되었다. 따라서 탁수 발생의 근원을 추적하기 위해서는 탁수의 부유물질 및 상류에 분포하는 암석의 풍화물에 관한 비교조사가 필요하였다. 이 연구를 위하여 탁수시료와 상류지역에 분포하는 암석풍화물 및 토양의 시료를 채취하였다.

탁수시료 채취는 임하호, 반변천 및 용전천에서 시도하였다. 임하호의 경우 JBY 합류점으로부터 하류 1km 지점에서 표층수를 수상 채취하였으며 반변천 상류의 진보 부곡교, 입암 삼산교, 영양 수위국에서 표층수를 육상 채취하였다(Table 2). 용전천은 탁류가 발생되지 않는 관계로 제외하였다. 한편 임하댐 만수시에 형성된 탁수로부터 흡착된 것으로 보이는 갈황색의 점토 물질들을 댐 수문 부근의 콘크리트 벽면에서 채취하였다.

반변천 유역의 영양군 일월면 문암리와 가천리의 밭 토양을 채취하였고, 그리고 용전천 유역의 청송군 부남면 화장리, 감연리, 파천면 지경리의 도로변 절개지 풍화단면으로부터 토양시료를 채취하였다.

### 8.2. 시료준비

채취한 탁수 중의 고형 부유물질을 필터로 분리하였다. 이 실험에서는 멤브레인 필터의 방법을 택하여 부유입자를 분리하였다. 분리된 부유물질은 105°C에서 건조후 무게를 측정하여 탁수 중 부유물질의 농도를 측정하였다. X선회절 분석을 위한 시편은 분리된 시료의 혼탁액을 슬라이드 글라스에 묻힌 후 상온 건조하여 제작하였다.

풍화물에 함유된 점토의 X선회절 분석을 위한 정방

Table 2. Turbidity and density of suspended materials in turbid waters from the Imha lake and Banbyeoncheon stream.

Location No.	Measuring or drawing location	Distance from JBY (km)	Turbidity (NTU)	Density (mg/l)
L1	Imha lake	1 downstream		44
L2	Bugok bridge	7 upstream		52
L3	Gwangdeok bridge	12 upstream	12.4	
L4	Samsan bridge	22 upstream		20
L5	Ibam bridge	30 upstream	7.5	
L6	Yeongyang office of water level	38 upstream	3.6	7
L7	Hwamaecheon	18 upstream	2.8	
L8	Dongcheon	30 upstream	2.0	

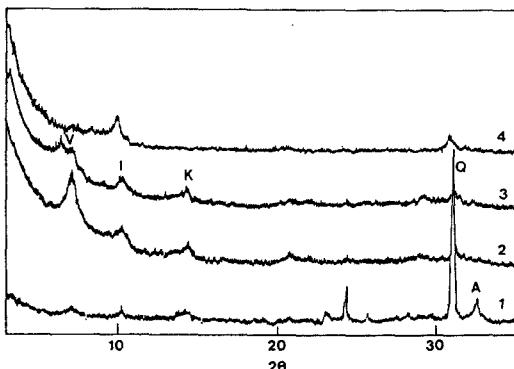
위 시편은 풍화물을 물에 분산시켜 하루 경과시킨 후 비이커 상부 혼탁액으로 제작하였다. 유도결합플라즈마 분석을 위한 시료는 건조후 아케이트 유발에서 200 매쉬 이하로 분쇄하여 준비하였다.

### 8.3. 탁수 중 부유물질의 농도

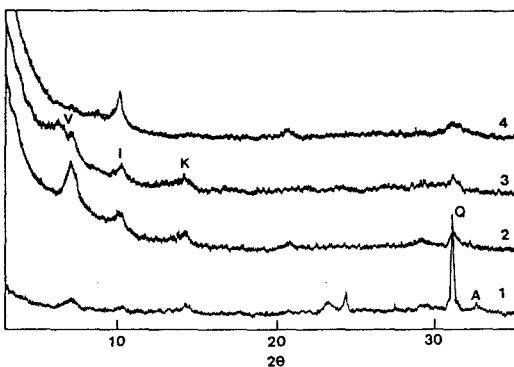
멤브레인 필터로 분리된 부유물질을 105°C에서 건조한 후 무게를 측정하여 표층수 중 부유물질의 농도를 얻었다(Table 2). 임하호 상류의 부유물질 농도가 반변천 부곡교보다 낮은 이유는 반변천 탁류에 탁도가 낮은 용전천이 유입되기 때문이다. 그리고 반변천의 부유물질 농도가 상류로 갈수록 줄어드는 것은 반변천 상류 유역에서 발생한 탁류가 빠른 속도로 하류로 배수되기 때문이다.

### 8.4. X선회절 분석

점토광물의 정확한 감정을 위하여 (1) 무방위 원시



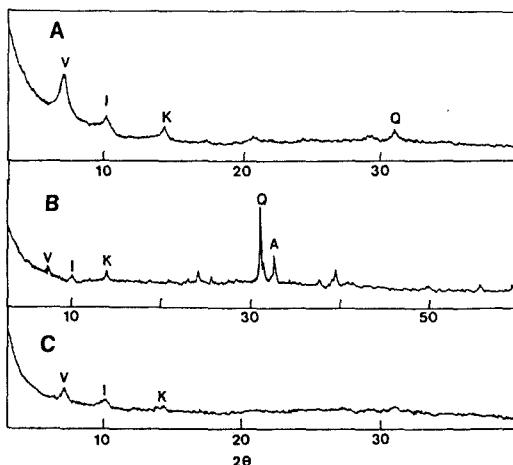
**Fig. 3.** XRD pattern from suspended materials in turbid water of the Imha lake. V, vermiculite; I, illite; K, kaolinite; Q, quartz; A, albite.



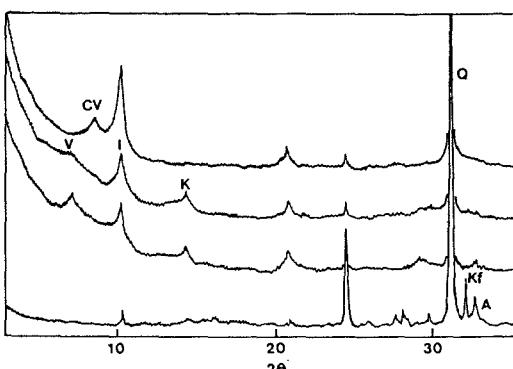
**Fig. 4.** XRD pattern from suspended materials in turbid water of Bugok bridge. Abbreviations are the same as Fig. 3.

료, (2) 정방위 원시료, (3) 에틸렌글리콜처리 정방위 시료, (4) 550°C 정방위 가열시료를 이용한 체계적인 분석을 실시하였다.

JBY 합류점 부근 임하호와 반변천 부곡교에서 채취한 탁수 부유물질(Fig. 3, 4A)은 동일한 광물조성을 갖는 것으로 밝혀졌다. 무방위 시료에서 14Å, 10Å, 7Å의 회절선을 보이는 점토광물, 석영, 알바이트, 적철석 등이 감정되었다. 정방위 시료의 에틸렌글리콜 처리 및 가열실험 결과, 점토광물의 종류는 베미큘라이트, 일라이트, 카올리나이트 등이 감정되었다. 특히 베미큘라이트는 에틸렌크리콜 처리시 14.3Å 회절선이 16.1Å과 14.4Å 회절선으로 분리됨을 알 수 있었는데 이는 베미큘라이트가 충분히 높은 것과 낮은 것의 두 종류



**Fig. 5.** XRD pattern from suspended materials in turbid water of Samsan bridge (A) and Yeongyang office of water level (B), and precipitated materials on gate wall of the Imha dam (C). Abbreviations are the same as Fig. 3.



**Fig. 6.** XRD pattern from clay materials in farm's soil of Munamri. Kf, K-feldspar; CV, chlorite-vermiculite mixed layer; the other abbreviations are the same as Fig. 3.

가 있음을 의미한다. 나머지 반변천 삼산교와 영양 수위국에서 채취한 시료는 분리된 양이 작아서 정방위 시편의 분석만 가능하였으나 동일한 광물조성을 갖고 있는 것으로 확인되었다(Fig. 4B, C). 이들 점토광물은 회절선이 매우 넓은 것으로 보아서 입자 크기가 상당히 작고 또 결정도가 매우 낮은 것으로 생각된다.

임하댐 수문벽면에서 채취한 시료(Fig. 5)는 분석결과 X선회절 패턴이 매우 약하게 나타나서 광물조성 분석이 매우 어려우나 베미큘라이트, 일라이트, 카올리나이트, 석영, 사장석, 방해석의 존재를 확인할 수 있었다. 방해석은 콘크리트 벽면에서 시료를 채취할 때 흔입된 것으로 원래 탁수에 존재했던 것이 아니다.

영양군 반변천 유역에서 채취한 토양은 주로 주위에 넓게 분포하는 도계동층 세일 및 알코스 사암의 풍화물이다. 일월산 문암리에서 채취한 토양(Fig. 6)은 절은 황갈색으로서 X선회절 분석에 의하면 주로 점토광물로 일라이트, 베미큘라이트, 카올리나이트, 녹나석/베미큘라이트 혼합층 광물, 베미큘라이트/카올리나이트 혼합층 광물 그리고 잔류 광물로 석영과 K장석, 알바이트가 있다. 특히 베미큘라이트는 에틸렌글리콜 처리후  $14\text{\AA}$  회절선의 왼쪽에 큰 회절띠가 나타나는 것으로 보아서 베미큘라이트의 충준전하가 높은 것과 낮은 것의 두 종류가 있음을 의미한다. 이 토양 베미큘라이트는 탁수의 베미큘라이트와 그 특성이 같은 것으로 주목된다. 영양군 가천리에서 채취한 적갈색 토양은 베미큘라이트, 일라이트, 카올리나이트, 석영, K장석, 알바이트, 적철석으로 구성된다.

청송군 화장리에서 채취한 토양(Fig. 7)은 모암이 응회암으로서 베미큘라이트, 일라이트, 카올리나이트, 석영, K장석, 알바이트로 구성된다. 이 토양에 함유된 베미큘라이트는  $14\text{\AA}$  회절선이 에틸렌글리콜 처리후에도 변화가 없는 것으로 보아서 충준전하가 높은 종류로 생각되며 탁수 중의 베미큘라이트와는 종류가 다른 것으로 추정된다.

청송군 감연리에서 채취한 세일의 풍화물인 적색 및 황회색 풍화물의 X선회절 분석결과 적색 풍화물은 일라이트, 카올리나이트, 베미큘라이트, 적철석, 석영, K장석, 알바이트로 구성되며, 황회색 풍화물(Fig. 8)은 스메타이트, 일라이트, 카올리나이트, 스메타이트/카올리나이트 혼합층 광물, 석영, K장석, 알바이트로 구성된다. 적색 풍화물의 베미큘라이트는 에틸렌글리콜 처리에서 탁수시료의 베미큘라이트와 매우 유사한 거동을 보인다.

청송군 지경리는 편마암 분포지로서 적갈색 토양이

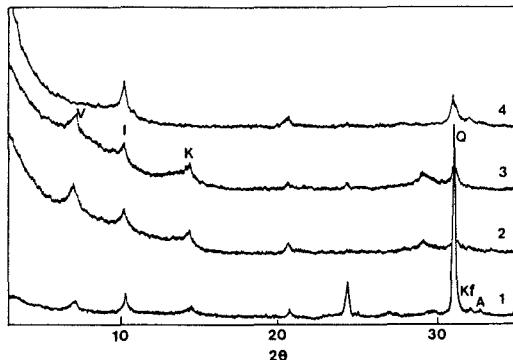


Fig. 7. XRD pattern from clay materials in soil of Hwajangri. Abbreviations are the same as Fig. 6.

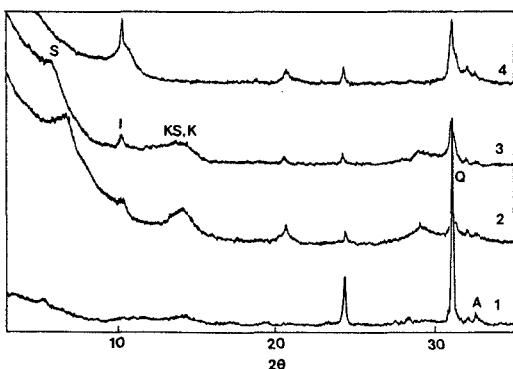


Fig. 8. XRD pattern from clay materials in soil of Gamyeonri. S, smectite; KS, kaolinite-smectite mixed layer; the other abbreviations are the same as Fig. 3.

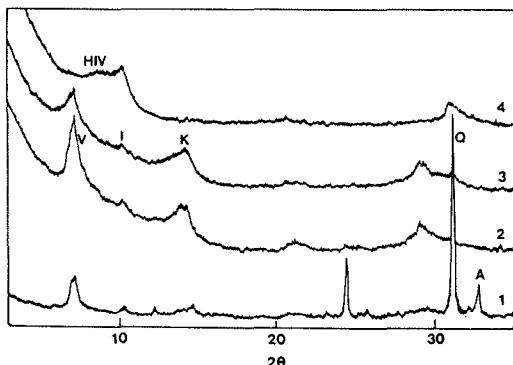


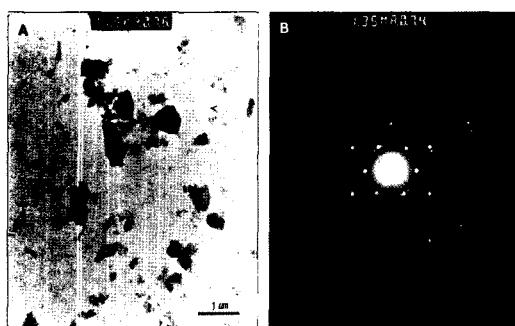
Fig. 9. XRD pattern from clay materials in soil of Jigyeongri. HIV, hydroxy vermiculite; the other abbreviations are the same as Fig. 3.

분포하고 있다(Fig. 9). X선회절 분석결과 석영, K장석, 알바이트, 카올리나이트, 흑운모/녹나석 혼합층 광물, 수산화층 베미큘라이트로 구성된다. 수산화층 베미큘라이트

**Table 3.** Mineral modes in suspended materials of turbid water and soils by XRD.

Sample No.	Sample and location	HV	LV	I	K	S	KS	CV	HIV	Hm	Q	A	Kf
Su1	Suspended materials in Imha lake	+	+	+	+					+	+	+	
Su2	Suspended materials in Bugok bridge	+	+	+	+					+	+	+	
Su4	Suspended materials in Samsan bridge	+	+	+	+					+	+	+	
Su6	Suspended materials in Yeongyang office of water level	+	+	+	+					+	+	+	
Pr1	Precipitated materials on dam wall	+	+	+							+	+	
So1	Soil in Munamri	+	+	+	+			+		+	+	+	+
So2	Soil in Gacheonri	+	+	+	+					+	+	+	+
So3	Soil in Hwajangri	+	+	+						+	+	+	
So4	Soil in Gamyeonri			+	+	+	+	+		+	+		
So5	Soil in Gamyeonri	+	+	+	+					+	+	+	
So6	Soil in Jigyeongri	+	+	+						+	+	+	

HV: highly charged vermiculite, LV: lowly charged vermiculite, I: illite, K: kaolinite, S: smectite, KS: kaolinite-smectite mixed layer, CV: chlorite-vermiculite mixed layer, HIV: hydroxy vermiculite, Hm: hematite, Q: quartz, A: albite, Kf: K-feldspar.

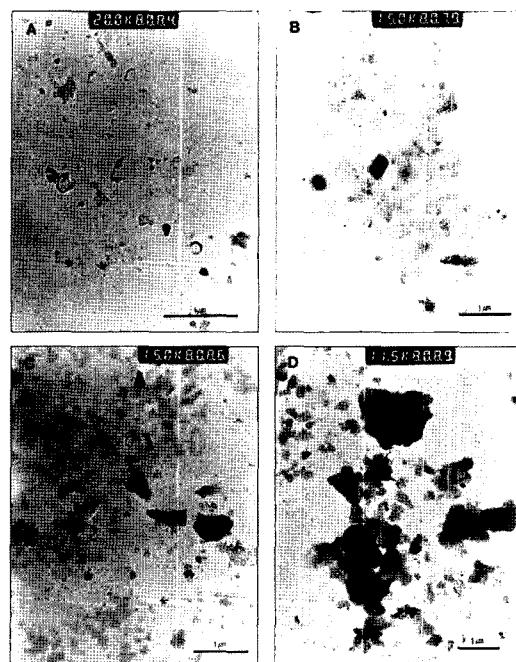


**Fig. 10.** TEM photomicrograph and electronic diffraction pattern of clay minerals from suspended materials in turbid water.

트는 암석의 토양화 과정에서 생성되는 독특한 광물로서 녹나석과 유사한 구조와 물리적 성질을 가지며 턱수 중의 베미큘라이트와는 다르다. X선회절 분석결과 확인된 광물의 종류는 Table 3에 정리되어 있다.

### 8.5. 투과전자현미경 분석

투과전자현미경 관찰결과 턱수 부유물질은 주로 불규칙한 형태를 갖는 판상의 점토광물들로 구성되어 있음을 알 수 있었다(Fig. 10). 점토광물의 결정도는 일반적으로 낮지만 상대적으로 결정도가 높은 경우에 카올리나이트는 육각판상으로, 일라이트는 긴널판상으로 산출된다. 따라서 턱수 점토광물의 불규칙한 형태는 베미큘라이트, 일라이트, 카올리나이트의 결정도가 상당히 낮음을 의미하며 이는 토양기원 점토광물의 일반적인 특징 중의 하나이다. 점토광물의 낮은 결정도는 X선회절 분석에서도 확인된 바 있다. 현재 X선회절 분석에서 확인된 베미큘라이트, 일라이트, 카올리나이트



**Fig. 11.** TEM photomicrographs of clay minerals in farm's soils of Munamri (A, B), and Gacheonri (C, D).

는 모두 그 형태가 서로 유사하여 투과전자현미경 사진만으로는 구분하기 곤란하지만 대체로 뚜렷한 윤곽을 갖는 큰 입자는 잔류 일라이트 또는 카올리나이트, 윤곽이 뚜렷하지 않고 작은 입자는 베미큘라이트로 판단된다. 이들 점토광물들은 너비 1 μm 이하, 두께 0.02 μm 이하의 크기를 갖는 얇은 판상체이다.

영양군 지역에서 채취한 토양에서 점토성분의 투과전자현미경 사진은 점토광물 입자들의 형태가 불규칙

한 판상을 하고 있어서 탁수 중의 점토광물의 입자 형태와 매우 유사함을 알 수 있다(Fig. 11). 판상 점토광물 입자들은 너비가  $2.3\text{ }\mu\text{m}$  정도의 큰 입자들과 작은 입자들로 구성된다. 상류에서 탁수로 혼입된 큰 입자들은 하류로 운반 도중에 가라앉아 하류나 임하호 내의 탁수는 보다 작은 점토 입자들로 구성된다.

### 8.6. 유도결합플라즈마 분석

부유물질과 토양의  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^t$  함량이 모암보다 높은데(Table 4), 이는 풍화대에서 기존 연구와도 같으며(Chesworth *et al.*, 1981; Eggleton *et al.*, 1987; Teveldal *et al.*, 1990; Drever and Zobrist, 1992; 김수진 외, 1994), 여기서 베미큘라이트, 일라이트, 카울리나이트 등의 점토광물과 적철석, 침철석 등의 산화철 광물함량이 높기 때문이다. 즉 모암에 함유되어 있던  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 와  $\text{Fe}_2\text{O}_3^t$ 가 풍화과정에서 점토광물 혹은 산화철광물의 형태로 침전 축적되었음을 의미한다. 임하호와 반변천 부유물질의 주원소 화학조성은 이들이 점토광물 및 산화철광물 그리고 석영, 알바이트로 구성되어 있음을 반영한다. 특히  $\text{K}_2\text{O}$ 의 함량이 평균 1.7% 정도인데 일라이트가 부유물질의 최소 20% 정도를 차지하고 있음을 의미한다.

부유물질 중 미량원소의 경우  $\text{Sr}$ ,  $\text{Ba}$ 은 점토광물 구조 내의  $\text{K}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{Ca}$  등의 알칼리 원소를 치환하고 있어 같은 거동을 하는 것으로 보인다. 미량금속원소 중

특히  $\text{Cr}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Cd}$ 의 함량이 토양에 비하여 비교적 높은데, 이는 금속원소들이 점토광물 구조 내에 다른 이온을 치환하고 있거나 전하를 띠는 규산염 표면에 흡착되어 존재하는 것으로 보인다.

## 9. 수질측면에서의 탁수기원

### 9.1. 탁수 중의 점토 부유물질 기원

베미큘라이트: 탁수 부유물질 중에서 가장 특징적인 점토광물은 2:1 층상광물인 베미큘라이트이다. 베미큘라이트는 장석의 풍화물로 생성되는 예는 드물며 일반적으로 운모나 녹나석의 풍화물로 산출된다(Kim *et al.*, 1989; 정기영와 김수진, 1994). 따라서 이 베미큘라이트는 주로 도계동층과 동화치층의 세일 및 알코스 사암 등에 함유되어 있던 일라이트나 녹나석이 풍화되어 생성된 것으로 보인다. 탁수 중 베미큘라이트는 충분전하가 높은 것과 낮은 것의 두 종류가 있는 것이 특징으로서 이와 같은 베미큘라이트는 영양지역 도계동층의 풍화토양에서 흔히 함유되는 것으로 확인된다. 청송군 부남면 감연리에서 채취한 적색 풍화물에 함유된 베미큘라이트도 같은 종류로 파악되나 청송지역의 경우 적색 풍화물의 모임인 동화치층과 도계동층의 적갈색 세일이나 사암의 분포가 작은 반면 영양지역의 경우 매우 넓게 분포하고 있다.

일라이트: 풍화과정에서 새로이 생성되었다가보다 퇴

Table 4. Major and trace element compositions of suspended materials of turbid water and soils by ICP.

Samples	Su1	Su2	Pr1	So1	So2	So3	So4	So5	So6	Sh1
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (wt%)	16.95	15.93	12.36	10.79	11.52	17.76	15.76	17.27	13.28	11.69
$\text{Fe}_2\text{O}_3^t$	6.55	6.88	10.35	5.02	4.19	5.10	2.97	6.45	4.93	1.49
MgO	1.89	2.14	4.68	1.48	1.14	0.85	0.81	1.56	1.01	1.21
$\text{TiO}_2$	0.87	0.77	1.10	0.75	0.65	1.00	0.82	0.90	0.80	0.32
MnO	0.18	0.14	0.57	0.10	0.08	0.08	0.01	0.09	0.09	0.04
$\text{K}_2\text{O}$	1.89	1.50	1.68	1.92	1.83	1.62	1.49	1.86	1.58	1.55
$\text{Na}_2\text{O}$	1.15	0.65	1.12	0.94	1.86	0.35	0.96	1.13	1.51	2.60
CaO	1.02	0.67	1.16	0.76	0.49	0.14	0.57	0.56	0.95	0.42
Sr(ppm)	148	119	305	76	88	57	86	114	194	293
Ba	699	579	1313	502	387	527	424	593	754	371
P	938	1023	990	1164	984	180	142	195	243	336
Cr	77	101	110	66	59	41	66	44	31	36
Co	23	25	27	20	14	17	15	20	16	4
Ni	41	61	38	24	23	17	23	47	14	5
Cu	28	41	103	17	20	11	7	15	13	5
Zn	109	269	624	67	53	58	45	64	56	39
Pb	66	71	149	55	43	58	50	60	38	35
Cd	11	9	13	7	6	7	4	9	6	2

Sh1, shale in Munamri.

적암류의 세일 및 사암 등에 함유되어 있던 것들에서 유래한 것으로 보인다.

**카올리나이트:** 풍화작용에 의해 생성될 수도 있고 퇴적암 중에 함유되기도 한다. 백악기 퇴적암류는 속성 작용이 거의 끝난 단계로 카올리나이트가 거의 함유되어 있지 않다. 따라서 탁수 중의 카올리나이트는 암석의 풍화과정에서 새로이 생성된 점토광물이다. 일반적으로 카올리나이트는 거의 모든 광물의 풍화산물로 생성된다(Kim *et al.*, 1989; Jeong and Kim, 1989; 문희수와 김신애, 1989; 정기영과 김수진, 1994). 이들은 일라이트나 베미큘라이트 등의 층상점토광물의 최종 풍화산물로 생성될 수도 있으며 알코스 사암에 함유되어 있는 사장석이 풍화되어 생성될 수도 있다. 탁수 중의 카올리나이트는 사장석 및 층상점토광물의 최종 풍화산물인 것으로 보인다.

**적철석:** 주로 적갈색 사암이나 세일의 주요 적색 쥬셀질이다. 따라서 대부분의 적철석은 적갈색 퇴적암의 풍화과정에서 분리된 것으로 보인다. 그러나 모암의 힘칠 규산염광물인 녹니석의 풍화과정에서 철분이 방출되어 산화철인 적철석을 생성할 수도 있다(Jeong and Kim, 1990).

**석영과 알바이트:** 석영의 미립자는 상류지역 알코스 사암과 세일에 함유되어 있던 것이 풍화과정에서 토양 속에 잔류한 것들이다. 석영과 마찬가지로 알코스 사암과 세일의 풍화 잔류물이다.

## 9.2. 탁수의 기원

분리한 부유물질의 분석결과에 의하면 탁수의 주요 성분은 점토광물이며 이들은 주로 퇴적암의 풍화산물이다. 반변천 상류 지역의 퇴적암은 주로 세일과 알코스 사암이며 이들은 주로 석영, K장석, 사장석, 일라이트, 녹니석 등의 광물로 구성된다. 퇴적암이 풍화작용을 받아 토양화되는 과정에서 장석광물은 카올리나이트로, 일라이트와 녹니석을 베미큘라이트로 변질되어 점토광물을 형성하게 된다. 이들 점토광물은 입도가 매우 작은 것이 특징이다. 탁수의 부유물질은 석영, K장석, 사장석, 일라이트, 베미큘라이트, 카올리나이트로 구성되지만 이 중에서 특히 입도가 작은 일라이트, 베미큘라이트, 카올리나이트 등의 점토광물은 탁수의 침전과정에서 가장 나중에 침전되는 것들이다. 탁수가 형성되어도 임하호 내에서 빠른 속도로 침전된다면 땅 하류에 영향을 미치지 못할 것이다. 실제로 대부분의 부유물질은 빠른 속도로 침전된다.

그러나 대량의 부유물질이 유입될 경우 극미립의 점

토광물은 절대적인 함량도 많아지게 되고 그만큼 침전 속도가 느린다. 정지된 물에서 밀도  $2.46 \text{ g/cm}^3$ 인 직경  $n \mu\text{m}$ 의 점토입자가  $h \mu\text{m}$  가라앉는데 걸리는 시간  $t$ 는  $1 = 1.262 \times 10^6 h/n^2$ 이므로  $2 \mu\text{m}$ 의 점토입자가  $1 \text{ m}$  가라앉는데 4일이 소요되며,  $1 \mu\text{m}$ 의 입자는 15일,  $0.5 \mu\text{m}$  점토입자는 2개월이 소요된다. 따라서 투과전자현미경 분석에서 관찰되는  $1 \mu\text{m}$  미만의 점토입자들이 오랜 동안 물속에 부유한 채로 존재하게 된다. 물론 정지된 물이 아닌 유수에서는 보다 더 오랫동안 부유하게 된다. 평소 조용한 강우시에 유입되는 탁수에는 미립의 점토광물의 절대량이 작기 때문에 호수에서 대부분의 부유물질은 희석되어 탁도가 약하다. 그러나 집중호우로 인한 홍수시 다량의 탁수가 급격히 땅에 유입될 경우 극미립의 점토광물은 상대량이 작지만 절대량이 많아지기 때문에 홍수 후 이들의 자연적인 침전에는 오랜 시간이 필요하게 된다.

반변천 부곡교에서 채취한 탁수 중 부유물질의 농도는  $52 \text{ mg/l}$ 이다. 가벼운 부유물질은 물에 뜬 채로 무거운 부유물질은 하천바닥 가까이에서 운반되기 때문에 수면 근처에서 채취한 탁수의 농도는 전체 반변천 부유물질의 농도보다는 작은 것으로 생각된다. 그러나 탁수에서 문제가 되는 것은 침전속도가 느린 부유물질이므로 표층수의 농도로부터 호수 내의 부유물질 총량을 추정할 수 있다. 임하호의 총저수량이 약  $595 \text{ 백만 m}^3$ 이므로 반변천 유입수로 만수가 될 경우 부유물질의 총량은 30,940톤 정도이다. 그러나 여름에 집중호우가 보다 컸을 때 탁도와 부유물질의 농도는 보다 높았을 것이고 따라서 임하댐 만수시의 부유물질 총량도 훨씬 많았을 것으로 추정된다. 이 정도의 부유물질이 땅 주변의 소규모 절개지나 기타 인위적으로 조성된 좁은 지역에서 유입되었을 가능성을 거의 없으며 상당히 넓은 지역의 토양층의 유실에 기인한 것이다. 현장 조사에서 용전천보다 반변천이 부유물질의 주 유입 통로이었다. 따라서 부유물질은 반변천 유역에 넓게 분포하는 도계동층의 세일, 알코스 사암 등의 풍화작용에 의하여 생성된 토양층의 미립의 점토광물들이다. 이러한 사실은 X선희열과 투과전자현미경 분석에서 밝혀진 부유물질과 이 지역 풍화물의 유사성에서 알 수 있었다.

반변천 유역의 지질은 도계동층이 가장 넓게 분포하며 이는 세일, 알코스 사암 등이 호층을 이루고 있으며 두 암석 모두 점토광물을 많이 포함하고 있고 풍화가 쉽게 일어난다. 용전천 유역은 주로 화산암류, 화강암류, 변성암류 등의 다른 암석도 많이 분포하며 세일과 사암이 분포하고 있지만 규모가 작고 혼펠스화로

쉽게 풍화되지 않는다. 따라서 이들 화산암류나 화강암류, 변성암류는 세일이나 알코스 사암에 비하여 풍화시 미립의 점토광물을 적게 생성하므로 청송 지역은 탁류 발생에 기여하는 정도가 매우 작은 것으로 생각된다.

임하호로 유입된 탁수 중의 점토 부유물질은 시간이 지나면 결국 호수 바닥에 침전된다. 그러나 유입된 탁수는 매년 점토의 일부를 호수바닥에 퇴적시킬 것으로 예상되지만 침전속도가 매우 느린 관계로 흥수조절과 발전에 의한 방류로 하류로 대부분 흘려보낼 것이다. 40mm 내외의 강우로 탁류 발생의 규모가 작을 경우에는 탁수가 호수 내로 유입되더라도 취수탑까지 도달하는 동안 침전되거나 희석되므로 댐 하류에 큰 영향을 미치지 않지만 장마나 흥수 등 호우가 지속될 경우 탁수가 호수 전체에 영향을 미치게 되어 장시간에 걸쳐 댐하류에 탁수를 방류할 수밖에 없을 것이다.

## 10. 결 론

영양지역의 고화가 덜 된 동화치층과 도계동층의 적갈색과 저색의 세일과 알코스 사암이 탁수를 공급하는 주 원인이다. 즉 용전천보다 반변천 유역에서 탁류를 일으키는 지질조건이 더 많이 존재한다. 반변천 유역 중에서도 도계동층을 주로 통과하는 반변천의 상류, 장군천, 서시천, 동천 등의 반변천 지류가 탁도를 가장 심하게 증가시킨다. 국부적으로는 동화치층을 통과하는 작은 지류들도 고탁류를 유발시킬 것으로 예상된다.

도로변 절개지는 대부분 미립의 점토광물로 구성되어 있을지라도 탁류 발생에 크게 기여하지는 않는 것으로 판단된다. 탁수 부유물질의 유입은 주로 영양군의 반변천 유역으로부터 풍화에 약한 세일 및 알코스 사암의 점토질 풍화물에 기인하는 자연적인 현상으로 생각된다. 따라서 일정기간 내에 안정화되어 유역으로부터 점토물질의 유입이 줄어들 것으로 기대하기는 어렵다.

지질조건이 고탁수를 발생시킬 수밖에 없지만 식생상태가 좋으면 탁류 발생을 약화시킬 수도 있다. 따라서 자연적인 지질조건을 변경할 수는 없지만 고탁수의 공급지인 도계동층, 동화치층과 단층대에서의 인위적인 지질환경변화를 최소화함으로서 탁도 저감방안을 고려해야 한다. 점토광물이 토양의 구성 물질이므로 반변천 상류지역의 경사지에 드러난 자연토양층의 토양 유실을 줄이는 것이 근본적 대책이다. 따라서 이 지역으로부터의 탁류 발생을 줄이기 위해서는 장기적으로 꾸준

한 토양보존 대책을 세워야만 한다.

## 사 사

본 논문은 임하호 탁도의 급격한 상승에 대한 원인을 찾기 위해 한국수자원공사의 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사한다. 심사과정을 통하여 원고를 검토하고 비평과 조언을 해주신 한국지질자원연구원 양동윤 박사, 충북대학교 서용석 교수께도 감사드린다. 그리고 그림제작에 있어서 안동대 대학원 김세현 군의 도움이 있었다.

## 참고문헌

- Chesworth, W., Dejou, J. and Larroque, P. (1981) The weathering of basalts and relative mobilities of the major elements at Belbex, France. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.45, p.1235-1243.
- Drever, J.I. and Zobrist, J. (1992) Chemical weathering of silicate rocks as a function of elevation in the southern Swiss Alps. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.56, p. 3209-3216.
- Eggleton, R.A. (1987) Weathering of basalt: Changes in rock chemistry and mineralogy. *Clays Clay Miner.*, v.35, p.161-169.
- Hatae, N. (1936) No. 18 Geological map of Yeonghae and Yeongdeok sheets. Geological Survey of Korea, 18p.
- Hwang, S.K. (1992) Geology around Imha dam, Korea. Development Institute of Andong District Society, v.3, p.49-72.
- Hwang, S.K., Chang, T.W., Kim, J.M., Ahn, U.S. and Lee, B.H. (2002) Lithofacies and multiphase emplacement in the Andong batholith. *J. Geol. Soc. Korea*, v.38, p.51-65.
- Hwang, S.K. and Kim, S.H. (2006) Magmatic processes of the Mupasan Tuff, southern and eastern Cheongsong, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v.42, p.253-271.
- Jeong, G.Y. and Kim, S.J. (1989) 7Å phase in the Sancheong kaolin: 7Å-halloysite or kaolinite? *J. Miner. Soc. Korea*, v.2, p.18-25.
- Jeong, G.Y. and Kim, S.J. (1990) Iron oxide minerals in the Sancheong kaolin deposits. *J. Miner. Soc. Korea*, v.3, p.79-88.
- Jeong, G.Y. and Kim, S.J. (1994) Genesis of kaolin in the Sancheong district, Korea: mineralogical and textural study. *J. Geol. Soc. Korea*, v.30, p.262-283.
- Kim, N.J., Kang, P.J. and Lee, H.K. (1970) Geological map of Jungpyeongdong sheet. Geological Survey of Korea, 19p.
- Kim, O.J., Hong, M.S., Won, J.K., Park, H.I., Park, Y.D. and Kim, K.T. (1963) Geological map of Dogyedong sheet. Geological Survey of Korea, 23p.
- Kim, S.J., Jeong, G.Y., Lee, S.J. and Kwon, S.K. (1989) Mineralogy of kaolin from Hadong-Sancheong area, Korea. *J. Miner. Soc. Korea*, v.2, p.11-17.
- Kim, S.J., Lee, M.S., Kim, W.S. and Lee, S.J. (1994) The

- change of natural environment in the Seoul area:  
environmental mineralogy on the granite weathering.  
*J. Geol. Soc. Korea*, v.30, p.284-296.
- Kim, S.W. and Park, B.S. (1970) Geological map of Yeongyang sheet. Geological Survey of Korea, 25p.
- Lee, D.S. and Lee, H.Y. (1963) Geological map of Yean sheet. Geological Survey of Korea, 22p.
- Lee, H.K. and Hong, S.H. (1973) Geoogical map of Cheongsong sheet. Geological and Mineral Institute of Korea, 23p.
- Mun, H.-S. and Kim, S.A. (1989) Kaolinitization process in intensely weathered granitic rocks, Ganghwa Island. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v.22, p.65-80.
- Teveldal, S., Horgensen, P. and Stuanes, A.O. (1990) Long-term weathering of silicates in a sandy soil at Nordmoen, Southern Norway. *Clay Miner.*, v.25, p.447-465.

---

2006년 8월 31일 원고접수, 2006년 11월 2일 게재승인.