

강원도 강릉시 강동면에 분포하는 폐탄광으로부터의 배수에 의한 임곡천 및 동해의 오염

Pollution of the Imgok Creek and the East Sea by the Abandoned Coal Mine Drainage in Gangdong-myeon, Gangreung, Kangwon-do

허 봉(Bong Heo)* · 유재영(Jae-Young Yu)*

요 약 : 소위 강릉 탄전 지대의 중앙부에 위치한 강원도 강릉시 강동면 지역에는 많은 하천들이 폐탄광으로부터의 산성 광산 배수에 의해 심하게 오염되고 있으며, 그 중 임곡천은 그 오염 정도가 가장 심각하다. 임곡천 오염의 주범은 영동 탄광 배수인데, 이로부터 임곡천에 유입되는 오염 성분은 Mg, Fe, Al, Si, Ca, Mn 및 SO₄ 등의 용존 주성분들과 Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Cd, Pb 및 U 등의 용존 부성분들이다. 이들은 임곡천에 유입된 후 부유 고형물 보다는 주로 용존 고형물의 형태로 이동한다. 부유 고형물은 Fe와 Al 성분이 우세하며, 주로 하천으로부터 침전되고 있는 또는 그 이전에 침전한 화합물들로 구성되어 있다. 용존 오염 성분은 유로를 따라 이동하면서 가장 하류에 도달하기까지 많은 양이 침전 및 희석에 의하여 하천수로부터 제거되어, 임곡천 수는 동해로 유입되기 직전에 오염되지 않은 일반 하천수의 수질과 크게 다르지 않은 수질을 갖게 된다. 이는 임곡천 자체는 탄광 배수에 의해 심하게 오염되고 있으나, 동해는 탄광 배수에 의한 오염이 거의 진행되고 있지 않음을 나타내는 것이다. 동해가 탄광 배수에 의해 거의 오염되지 않고 있음은 해수 및 해저 퇴적물의 화학 분석을 통하여 확인할 수 있다. 임곡천 하구수 및 해수의 화학조성은 세계 평균 해수의 함량과 별다른 차이를 보이지 않으며, 해저 퇴적물 내의 오염 성분의 함량도 어떠한 분포 및 경향성도 나타내지 않는다. 따라서 현재 탄광 배수로부터 공급된 오염 물질들이 임곡천을 통해 동해로 유입되는 양은 미미하며 또한, 해수의 막대한 양에 쉽게 희석되어 동해에 심각한 오염을 야기 시키지는 못할 것으로 생각된다. 그러나, 시간이 흐르면서 임곡천으로 유입되는 지류들이 탄광 배수에 의해 오염되고, 그 결과 오염 물질이 좀 더 하류쪽으로 다량 이동된다면, 동해도 가까운 장래에 탄광 배수에 의한 심각한 오염 가능성이 있다. 그러므로, 현재 심각한 오염이 진행중인 임곡천의 수질 개선 및 환경 개선에 대한 구체적인 방안 마련은 물론이고, 아직 동해의 오염이 심각하지 않은 지금 탄광 배수에 의한 동해의 오염 발생에 대한 대책과 예방책을 마련하는 것이 필요할 것이다.

Abstract : Imgok creek is the most severely polluted one out of the streams which have been being polluted by acid drainages from the abandoned coal mines in the Gangdong-Myeon area, the central part of the so called Gangreung coal field. Imgok creek is being mainly polluted by the drainage from Youngdong coal mine, which supplies such pollutants as Mg, Fe, Al, Si, Ca, Mn, and SO₄ as major dissolved components and Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Cd, Pb, and U as minor dissolved components. After the influx, the pollutants migrate mainly as dissolved solid, rather than as suspended solids along Imgok creek. The suspended solids in Imgok creek are very rich in Fe and Al, indicating that they mainly consist of the precipitates of present and past from the polluted water. Most of the dissolved components in the stream waters of Imgok creek removed from the aqueous phase by precipitation and dilution before reaching the East Sea, so that water quality of the downstreams of Imgok creek is very similar to that of unpolluted tributaries. It suggests that Imgok creek itself is now being severely polluted by the acid drainages from the abandoned coal mines, but the East Sea is relatively safe from the same pollution. The estuary and sea waters around the Goonseon estuary, which accepts Imgok creek water, certainly show no significant difference in chemical compositions from the mean oceanic water. The bottom sediments at the sampling sites of the sea waters also show no significant trend of their component variation, especially the variations of Fe, SO₄ and Al concentrations. These facts again support that the acid mine drainage is not considerably polluting the East Sea. However, the tributaries supplying the fresh water to the Imgok creek will be certainly polluted by the acid mine drainage as time passes and pollutants will have more chance to migrate in significant amount to the downstream area, which all can be a real threats to the East Sea on the pollution

*강원대학교 지질학과(Department of Geology, College of Natural Science, Kangwon National University, Chuncheon, Kangwon-do 200-701, Korea)

possibility. Therefore, it is suggested that urgently required are not only water quality and environmental improvement of the severely polluted Imgok creek but also preparation of the measures on the possible future pollution of the East Sea by the acid drainage from the abandoned coal mines in the area, while the East Sea is still not much affected by the pollution of the same kind.

서론

폐광으로부터의 산성 배수에 의한 환경 피해의 심각성은 이미 국내에서도 널리 인식되어, 그동안 적지 않은 연구자들이 이에 대해 여러 각도로 연구하여 왔다. 이들의 연구 결과는 국내 폐탄광으로부터의 산성 배수가 하천을 어떠한 오염물질로 얼마나 오염시키는지(유재영, 1994; 오대균 등, 1995; Yu, 1996a), 산성 배수에 의한 하천 오염의 정도를 어떻게 평가할 것인지(Yu, 1996a), 산성 배수에 의해 오염된 하천에서 오염 성분간의 평형과 특정 성분의 침전이 어떻게 진행되며 이것이 어떻게 중요한지(김진범, 1993; Yu, 1996b), 산성 배수에 의한 주변 하천 및 토양의 오염이 주변 식물에 어떠한 영향을 미치는지(이무성 등, 1996), 그리고 산성 배수로 인한 환경 오염을 어떻게 방지하고 개선할 것인지(홍영국, 나현준, 1995)등에 대해서 좀 더 폭넓게 이해할 수 있도록 하였다. 그러나 현재 국내 여러 곳에서 일어나고 있는 폐탄광에 의한 환경 오염의 규모와 정도를 고려할 때, 지금까지의 활발한 연구에도 불구하고 아직도 좀 더 다양한 측면에서의 더욱 많은 연구들이 필요하다 하겠으며, 그 중에서도 특히 운반되는 오염 물질의 형태와 양에 대한 보다 정량적인 분석과 이를 바탕으로 한 오염 정도 평가 및 그 가능성 예측에 대한 연구가 시급하다 하겠다.

이 연구는 하나의 사례 연구로서, 임곡천을 대상으로 폐탄광의 산성 배수로부터 유래된 오염 물질이 유로를 따라 어떠한 형태로 얼마나 운반되는지 밝히고, 이를 바탕으로 산성 배수에 의한 임곡천 및 동해의 현재 오염 정도 그리고 앞으로의 오염 가능성 등을 평가하는데 그 목적이 있다. 임곡천은 소위 강릉 탄전의 중앙부를 차지하는 강동면 지역의 중앙을 가로질러 남에서 북으로 흐르는 하천으로, 총 길이는 대략 15 km 정도 되며, 군선천과 합류한 후 동해로 유입되는 전형적인 감입곡류하천(incised meander)이다(Figure 1). 강동면 지역에는 많은 탄광들이 가행 되어 왔으나 지금은 석탄산업합리화 조치에 의해 모두 폐광된 상태이다. 이들 탄광의 폐쇄는 산성 배수의 발생 방지 및 처리를 위한 적절한 조치 없이 단행되어, 폐광으로부터 발생된 다량의 산성 배수가 주변의 군선천, 임곡천 그리고 정동천 등으로 유입되며 이들을 심각하게 오염시키고 있다. 이들 오염이 진행중인 하천중, 임곡천의 오염이 가장 심각한 편이다. 임곡천을 따라서는 가장 상류 지역에 위치한 영동 탄광과 임곡천 양안에 위치한 동림, 정림, 풍림, 강릉 및 명주 탄광 등 많은 폐탄광들이 분포하고 있으나(Figure 2), 야외 관찰 결과 오직 영동 및 강릉 탄광만이 임곡천

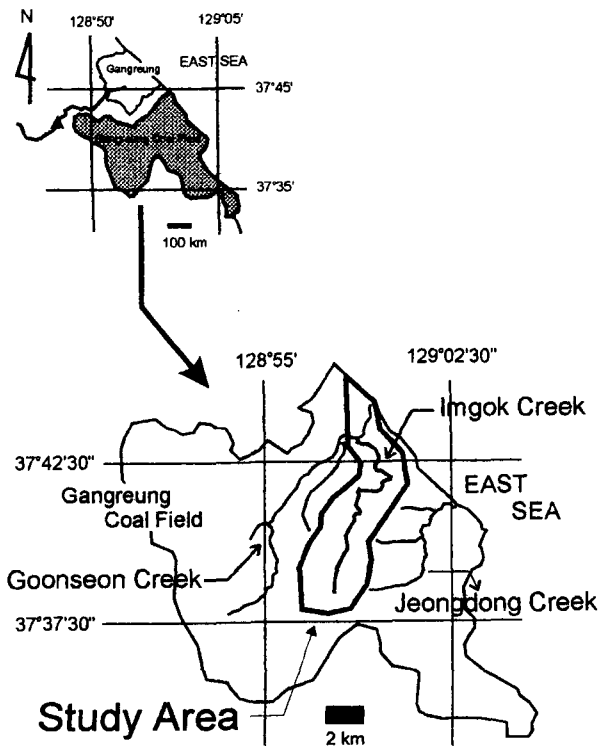


Figure 1. Location of the study area.

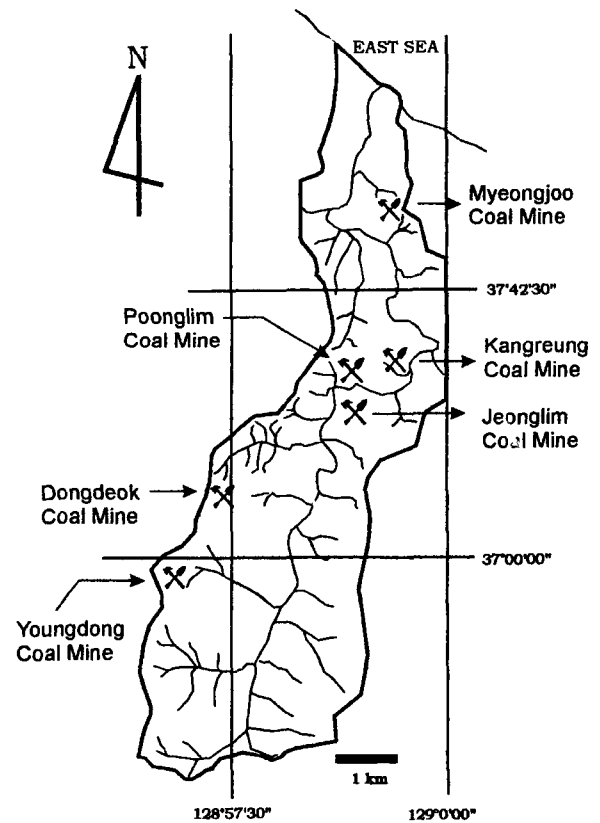


Figure 2. Locations of the abandoned coal mines in the catchment area of Imgok creek.

으로 산성 배수를 유입시키고 있는 것으로 확인되었다.

임곡천은 산성 배수에 의해 오염되기 전에는 그 양안의 수 많은 주민들의 일상 생활과 농업 활동을 위해 필수 불가결한 하천이었다. 그러나, 지금 임곡천은 어떠한 목적에도 이용할 수 없는 폐하천이 되어버렸고, 아직 상수도 공급이 안되는 이 곳의 주민들은 필요로 하는 물을 폐탄광의 영향이 미치지 않는 깊은 산속의 계곡수로부터 공급 받아야 하는 실정이다. 이는 이 지역 주민의 건강에 심각한 위협이 될 수 있을 뿐만 아니라, 다른 모든 사람들처럼 이들도 깨끗하고 쾌적한 환경을 누려야 할 권리가 있다는 점에서 시급히 개선되어야 할 것이다. 더욱이, 임곡천은 군선천과 합류한 후 바로 동해로 유입되므로, 임곡천의 오염은 직접적으로 동해의 오염으로 이어지며, 이는 다시 이 곳 어업의 생산성에 치명적인 타격을 줄 수 있다. 그러므로, 임곡천의 오염에 대한 대책 마련과 이의 방지를 위한 모든 가능한 노력을 기울이는 것은 임곡 지역 주민 뿐만 아니라 그 하류의 어민에게도 대단히 중요한 일이다. 이러한 점에서 산성 배수로부터 유래된 오염 물질이 임곡천을 따라 어떠한 형태로 운반되며, 이는 임곡천과 동해의 오염에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보는 것은 매우 필요한 일이며 또한 시의 적절하다 하겠다.

연구방법

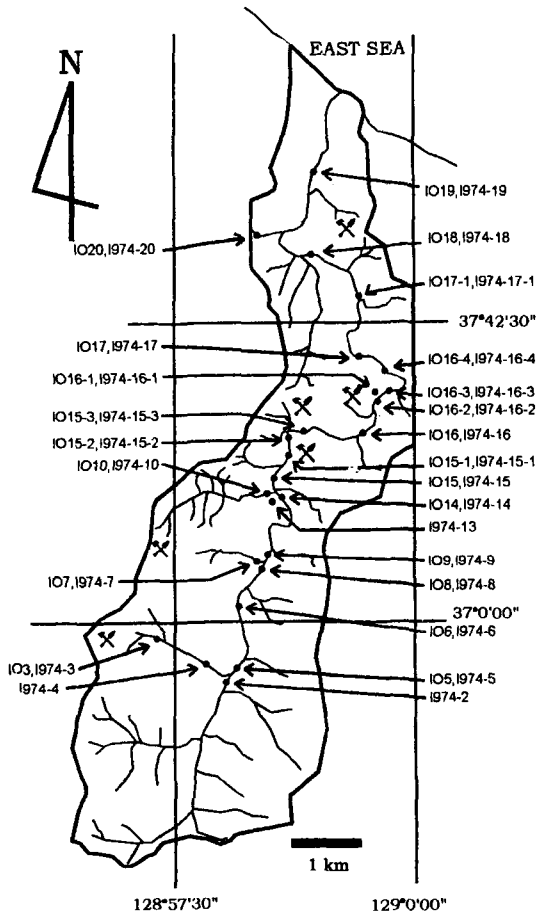


Figure 3. Locations of the stream water sampling sites along Imgok creek.

시료 채취 및 처리

Figure 3은 1996년 10월과 1997년 4월에 임곡천을 따라 채취한 하천수 시료들의 채취 위치를 나타낸 것이며, Figure 4는 1997년 4월에 채취한 해수 및 해저 퇴적물 시료의 채취 지점을 나타낸 것이다. 임곡천을 따른 하천수 시료 채취 지점은 가능한 한 유로를 따라 등간격으로 배열하려 노력하였으며, 지류 또는 산성 배수가 유입되는 곳에서는 이들 시료와 이들이 유입되기 전 및 후의 분류 시료를 채취할 수 있도록 시료 채취 지점을 조정하였다. 해수 및 해저 퇴적물의 시료 채취 지점은 해류의 방향을 고려하여 임곡천의 하구로부터 남쪽방향으로 피라미드 형태로 10개의 지점에서 채취하였다(Figure 4). 하천수 시료는 K 퍼(dipper)를, 해수 시료는 베일러(bailer)를, 그리고 해저퇴적물 시료는 그랩 샘플러(grab sampler)를 이용하여 채취하였다.

하천수 및 해수와 같은 액상 시료는 채취 직후 모두 0.45 m 미세 공극 여과기를 이용하여 여과하였으며, 이 여과액중 일부는 다시 Appelo and Postma(1993)의 방법에 따라 산처리 하였다. 이렇게 여과만을 한 시료와 여과 및 산처리 한 시료는 Potts(1987)의 방법에 따라 세척한 500 mL 및 250 mL 폴리에틸렌 병에 각각 담아 분석시 까지 냉장고에 보관하였다.

측정 및 분석

하천수 및 해수의 온도, pH, Eh, 및 전도도(conductivity)와 하천수의 유량은 하천수와 해수의 시료를 채취할 때 현장에서

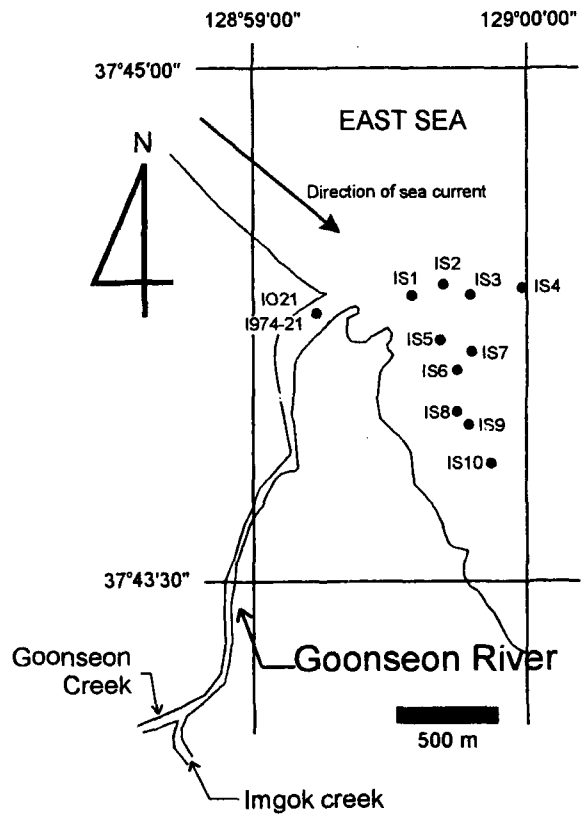


Figure 4. Locations of the seawater and the bottom sediment sampling sites on the East Sea around Goonseon estuary.

측정하였다. 하천수 및 해수의 온도와 pH는 SUNTEX SP-701 다목적 전위차계로, Eh는 Cole-Parmer Digi-Sense 산화-환원 전위차계(ORP-meter)로, 그리고 전도도는 SUNTEX SC-12 전도도계로 측정하였다. 하천수의 유량은 각 시료 채취 지점에서 하천의 폭을 측정하고, 하천을 가로질러 0.5내지 1 m 간격으로 수심과 유속을 측정하여, 이들을 토대로 계산하였다. 이때, 유속 측정에 사용된 유속계는 SWOFFER Model-2100이다.

하천수 시료의 알칼리도는 여과 처리만을 한 시료에 대하여 그랜법으로 측정하였다(Wetzel and Linkens, 1991). 하천수 내의 부유 고형물(이후부터는 이를 간략하게 '부유물'이라 한다)의 양은 1) 하천수 시료 500 mL를 0.45 m 미세 공극 여과지로 여과하고, 2) 이 여과지를 백금 도가니에 담아 전기로에서 700°C로 30분간 가열한 후, 3) 테시케이터에서 30분간 냉각 시킨 다음 무게를 측정하였으며, 4) 이 무게가 일정해질 때까지 과정 3)과 4)를 반복한 후, 5) 이 일정한 무게와 백금 도가니 만의 무게 차이로부터 결정하였다.

채취된 시료 및 여과된 부유물의 화학 조성은 기초과학연구지원센터의 ICP-AES와 ICP-MS 그리고 강원대학교 화학과의 IC를 이용하여 분석하였다. ICP-AES/ICP-MS로는 Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K 및 S 등의 주성분과 Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Mo, Cd, Cs, Ba, Pb, Th 및 U 등의 부성분을 분석하였으며, IC로는 Cl, NO₃, 및 SO₄ 등의 음이온 성분을 분석하였다. 하천수 및 해수 시료의 음이온 성분 분석에는 여과처리만 한 시료를 이용하였으며, 그 외의 분석에서는 여과 및 산처리한 시료를 사용하였다. 하천수 및 해수 내의 CO₃ 함량은 측정된 알칼리도가 모두 수산기와 탄산기에 기인한다는 가정하에 계산하였다. 하천 부유물은 1) 무게 측정이 끝난 부유물을 포함하는 백금 도가니에 진한 불산(HF) 2 mL와 진한 염산(HCl) 2 mL를 첨가하여 용해시킨 후, 2) 이 용액을 약 120°C로 가열하여 증발시킨 다음, 3) 증발 잔류물을 1:10 염산 5 mL로 녹인 뒤, 4) 이를 100 mL로 희석 시킨 용액을 화학 분석하였다. 해저 퇴적물 시료의 일부는 1) 세척 및 건조시키지 않은 시료 20 g과 2 N HCl 50 mL를 삼각플라스크에 담아 진탕기로 30분간 진탕시킨 뒤, 여과지에 걸러 여과액의 주성분과 부성분을 분석하였으며, 또 다른 일부는 2) 증류수로 세척하여 120°C로 건조시킨 후, 분쇄하여 시료 0.1 g을 HNO₃+HF+HClO₄(4:4:1) 혼합산으로 완전히 용해시킨 후 화학 분석하였다.

결과 및 토의

하천수

Table 1은 1996년 10월과 1997년 4월에 현장에서 측정한 수질을 정리한 것이다. 이를 살펴 보면, IO7, I974-2, I974-7-1, I974-10-1 및 I974-16-5 등 폐탄광 배수에 의해 오염되지 않은 지류의 시료들은 대략 pH 7, Eh 400 mV 그리고 전도도 70내지 290 μS/cm의 값을 나타낸다. 이에 비해, 폐탄광 배수에 의해 오염된 시료들은 오염되지 않은 시료들에 비해 훨씬 낮은 pH, 약간 높은 Eh, 그리고 매우 높은 전도도를 보이는 것이 일반적이다. 예를 들면, 1996년 10월의 경우 오염된 시료들의 pH는 2.7에서 5.4, Eh는 462에서 706 mV 그리고 전도도는

400에서 2840 μS/cm의 범위를 보이며, 1997년 4월의 경우에는 pH 2.8~7.5, Eh 238~606 mV, 전도도는 270~2530 μS/cm의 범위를 보인다. 이러한 이유는 폐탄광 배수가 황철때 산화 결과 발생한 많은 양의 수소 이온을 갖고 있어 pH가 몹시

Table 1. Field measurement data along the Imgok creek

Sample No.	Date	T (°C)	pH	Eh (mV)	Conductivity (μS/cm)	Remark
IO3	October 8,	11.1	2.90	615	2250	polluted
IO5	1996	17.5	2.57	706	2840	polluted
IO6		15.4	2.82	676	2030	polluted
IO7	October 9,	11.5	7.50	489	297	unpolluted
IO8	1996	10.3	2.85	670	1520	polluted
IO9		11.8	3.32	640	858	polluted
IO10		15.0	5.40	462	315	polluted
IO14		17.0	3.25	609	853	polluted
IO15		16.6	3.35	601	785	polluted
IO15-1		16.8	3.53	557	673	polluted
IO15-2	October 10,	9.2	3.79	549	661	polluted
IO15-3	1996	11.8	3.67	529	647	polluted
IO16		11.0	3.64	542	688	polluted
IO16-1		19.2	3.34	588	1453	polluted
IO16-2		17.0	3.79	569	705	polluted
IO16-3		17.6	3.63	576	774	polluted
IO16-4		16.0	3.32	579	734	polluted
IO17	October 11,	11.8	3.62	584	705	polluted
IO17-1	1996	12.0	3.82	557	697	polluted
IO18		13.8	3.58	607	697	polluted
IO19		15.8	4.09	543	359	polluted
IO20		17.8	4.67	483	189	polluted
I974-2	April 21,	13.7	7.53	316	234	unpolluted
I974-3	1997	12.5	2.78	606	2500	polluted
I974-4		14.7	2.85	580	2530	polluted
I974-5		12.8	4.02	475	721	polluted
I974-6	April 22,	9.9	6.61	238	469	polluted
I974-7	1997	11.1	5.06	438	561	polluted
I974-7-1		9.1	6.80	442	91	unpolluted
I974-8		10.3	6.95	244	469	polluted
I974-9		11.1	6.10	340	518	polluted
I974-10		10.7	6.80	460	249	polluted
I974-10-1		12.1	7.05	440	76	unpolluted
I974-13		10.2	6.70	440	251	unpolluted
I974-14		10.9	6.97	287	462	polluted
I974-15		10.8	7.03	279	454	polluted
I974-15-1		12.0	7.02	281	426	polluted
I974-15-2		12.2	5.60	455	429	polluted
I974-15-3		12.1	6.36	373	423	polluted
I974-16		12.2	4.82	466	442	polluted
I974-16-1		14.1	3.69	533	1225	polluted
I974-16-2		12.7	4.87	478	444	polluted
I974-16-3		12.6	4.73	494	460	polluted
I974-16-4		12.2	4.55	489	461	polluted
I974-16-5		13.6	7.26	387	116	unpolluted
I974-17		11.9	4.51	484	444	polluted
I974-17-1		12.2	4.59	478	440	polluted
I974-18	April 23,	9.5	4.78	447	405	polluted
I974-19	1997	11.4	5.16	427	271	polluted
I974-20		11.1	5.64	410	144	polluted

낮기 때문이며, 이 낮은 pH는 탄층 또는 주변 암석에 존재하는 중금속의 용동성을 급속히 증가시켜 이번에는 탄광 배수 내의 전도도를 매우 높이기 때문이다. Eh는 자연수에서 주로 Fe와 용존 산소의 산화-환원 반응에 의해 조절되는 것으로 알려져 있다(Drever, 1988). 임곡천은 지표수이므로, 용존 산소가 Eh에 미치는 영향은 폐탄광 배수가 유입되든 그렇지 않은 간에 별다른 차이가 없을 것이다. 따라서 임곡천의 Eh 변화는 주로 황철석의 산화로부터 생성된 용존 Fe^{2+} 와 Fe^{3+} 의 산화-환원 반응에 의해 지배를 받는 것으로 생각된다.

Table 1에 정리한 수질의 계절적 변화를 살펴보면, 1996년 10월의 임곡천수가 1997년 4월의 것에 비하여 전체적으로 더 낮은 pH와 더 높은 전도도를 보여, 봄철보다는 가을철에 오염이 더 심화되어 있음을 알 수 있다. 최상류의 영동 탄광 배수인 IO3(96년 10월 시료)와 1974-3(97년 4월 시료)의 수질 차이가 거의 없는 점을 고려한다면, 이러한 계절적인 수질의 변화는 계절에 따른 지류 유입량의 변화에 주로 기인한다 할 수 있을 것이다. 실제로 유량 측정 결과를 비교하여 보면, 1996년 10월보다 1997년 4월의 유량이 더 많음을 알 수 있으며(Figure 5), 이는 1996년 10월보다 1997년 4월에 오염되지 않은 지류수가 더 많이 유입되고 그로 인한 오염물의 희석으로 오염 정도가

많이 낮아졌음을 시사하는 것이다. Table 2는 1996년 5월부터 1997년 4월까지의 강릉 지역의 월별 강우 및 적설량을 비교한 것이다. 이들 월별 강우 및 적설량을 살펴보면, 1996년 10월 및 그 몇 개월 전의 강수량이 1997년 4월 및 그 몇 개월 전의 강수량보다 훨씬 많아 오히려 10월의 하천수 오염 정도가 더 낮아야 할 것처럼 보인다. 그러나, 5월과 9월 사이에는 많은 양의 강수가 내리긴 하지만, 일시에 많은 양이 공급되어 대부분 지표로 유실되고, 하천의 유로를 따라 쉽게 하류로 이동되므로 순간적인 영향만을 미칠 것이다. 이 반면에, 4월에는 10월에서 3월 사이에 내렸던 눈이 쌓여 있다 봄이 되어 녹으면서 오염되지 않은 지류가 꾸준히 임곡천으로 유입되었을 것이다. 이 때문에 97년 4월의 수질이 96년 10월의 것보다 상대적으로 양호한 것이다.

Table 3은 하천수 시료들의 용존 주성분 함량을 Livingstone (1963)이 제시한 세계 평균 담수(world average freshwater: WAF)와 비교하여 정리한 것이다. 폐탄광 배수에 의해 오염되지 않은 시료들은 모든 용존 주성분의 함량이 세계 평균 담수의 함량과 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 영동 탄광 배수가 유입되는 IO3와 1974-3 시료의 Mg, Fe, Al, Si, Ca, Mn 및 SO_4 등의 용존 성분의 함량은 세계 평균 담수의 함량과 비교하여 볼 때 수십배에서 수천배 높으므로, 이들이 폐탄광 배수로부터 공급되는 주 오염 물질임을 알 수 있다. 한편, Na, K, Cl 및 NO_3 등은 오염되지 않은 시료와 오염된 시료 사이에 별다른 함량 차이를 보이지 않고, 세계 평균 담수의 함량과도 큰 차이를 보이지 않아 폐탄광 배수에 의해 임곡천에 유입되는 오염 물질이라고 생각하기 어렵다.

용존 부성분 함량도 세계 평균 담수와 비교하여 Table 4에 정리하였다. 폐탄광 배수에 의해 오염된 하천수내 용존 부성분 역시 용존 주성분과 마찬가지로 대부분의 성분이 탄광 배수에 의해 오염되지 않은 시료 및 세계 평균 담수의 함량 보다 매우 높은 농도를 보인다. 특히 폐탄광 배수에 의해 오염된 하천수의 Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Cd, Pb 및 U 등의 함량은 매우 높아 이들도 역시 주된 오염물질임을 알 수 있다. 반면에 Mo과

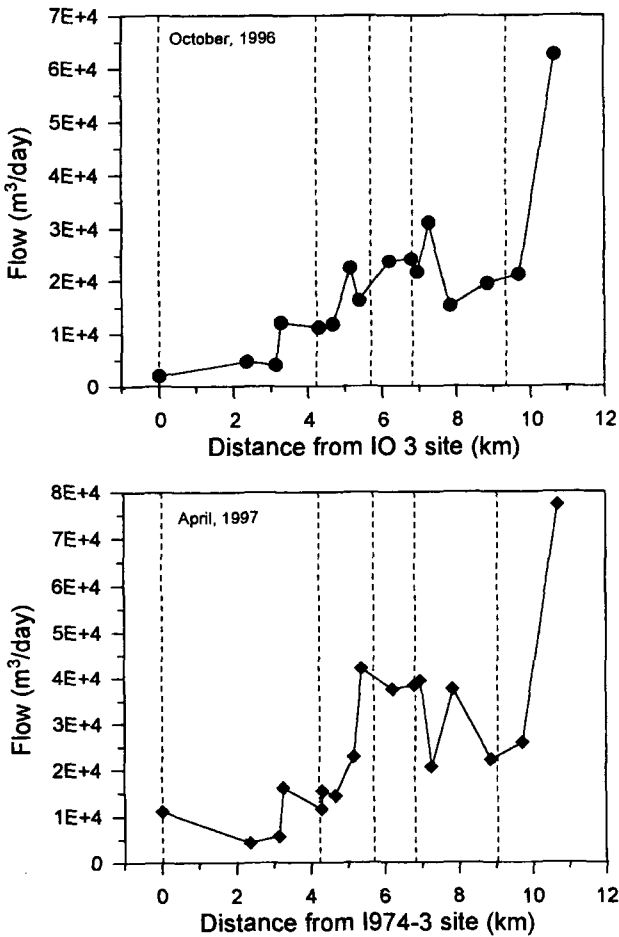


Figure 5. Variations in the flow quantity of the stream waters along Imgok creek. The vertical lines represent the points of abandoned coal mine drainage inflow.

Table 2. The rain precipitation and snow accumulation in the Kangreung area

Period	pre- cipitation (mm)	cumulative precipitation (mm)	snow accumulation (cm)	cumulative snow accumulation (cm)
May, 1996	17.6			
June, 1996	279.0			
July, 1996	193.9	882.5		
August, 1996	220.2			
September, 1996	32.5			
October, 1996	139.3			
November, 1996	82.0		5.5	
December, 1996	22.5			
January, 1997	44.9	293.5	59.6	110.2
February, 1997	48.9		37.5	
March, 1997	45.6		7.6	
April, 1997	49.6			

강원도 강릉시 강동면에 분포하는 폐탄광으로부터의 배수에 의한 임곡천 및 동해의 오염

Table 3. The major dissolved component concentrations (mg/l) in the water samples collected from the Imgok creek

Sample No.	Mg	Si	Ca	Mn	Fe	Al	Na	K	Cl	NO ₃	SO ₄	CO ₃	T-alk
IO3	114.00	16.20	207.00	16.30	396.00	117.00	3.31	1.02	0.59	14.70	2846.44		
IO5	104.00	15.20	188.00	14.60	298.00	117.00	3.17	1.05	1.51	1.29	2810.16		
IO6	63.40	10.10	125.00	8.66	113.00	65.60	3.17	0.89	1.50	3.86	1570.04		
IO7	8.50	2.10	44.10	n.d.	0.17	0.02	3.00	0.85	3.94	6.30	58.43	138.04	115.00
IO8	43.10	7.89	109.00	6.32	103.00	47.90	3.09	0.87	1.82	1.55	1210.49		
IO9	28.30	5.05	75.40	2.95	27.50	22.60	3.02	0.98	3.81	4.54	599.25		
IO10	8.39	4.76	43.00	0.84	0.37	0.18	3.05	0.68	0.55	n.d.	172.28		
IO14	26.50	4.59	74.70	2.38	13.10	18.00	3.01	0.99	3.81	4.47	533.33		
IO15	24.10	4.58	72.90	2.12	10.80	15.60	3.12	1.03	3.67	3.83	491.39		
IO15-1	22.40	4.54	67.70	1.90	7.59	13.20	3.16	1.00	3.63	3.81	446.44		
IO15-2	22.80	4.79	68.10	1.82	7.49	15.50	3.25	1.01	3.73	3.89	488.39		
IO15-3	22.00	4.69	66.10	1.76	6.60	14.10	3.18	1.12	3.58	4.06	452.43		
IO16	22.20	5.20	65.70	1.80	9.92	19.30	3.20	1.27	3.95	3.82	488.39		
IO16-1	31.70	11.10	56.30	2.74	150.00	59.40	5.60	1.31	3.23	n.d.	1183.52		
IO16-2	22.20	5.40	64.70	1.76	8.29	19.10	3.43	11.50	4.31	4.10	476.40		
IO16-3	22.90	5.81	61.50	1.84	19.10	22.70	3.72	2.06	5.09	3.15	539.33		
IO16-4	21.50	5.66	59.30	1.77	13.60	21.00	3.65	1.89	5.53	3.16	503.37		
IO17	21.50	5.55	63.70	1.74	12.30	20.70	3.72	3.14	5.19	2.49	494.38		
IO17-1	21.70	5.51	62.20	1.94	8.96	18.80	6.39	5.48	11.34	2.24	488.39		
IO18	20.90	5.65	62.00	1.93	7.72	19.90	3.88	1.64	5.56	2.55	482.40		
IO19	9.80	5.03	33.70	0.88	2.14	6.49	4.97	1.77	6.39	5.24	217.53		
IO20	3.67	4.52	13.70	0.30	1.95	1.52	4.75	2.81	6.35	5.23	85.99		
I974-2	5.68	1.68	43.70	n.d.	0.03	n.d.	1.52	0.56	5.03	9.33	8.09	173.46	144.51
I974-3	131.20	14.70	198.40	10.20	293.00	88.40	3.49	1.01	4.54	1.28	2355.06		
I974-4	148.64	11.90	200.00	10.20	328.00	105.00	2.93	0.83	4.83	1.97	2519.85		
I974-5	23.80	4.26	76.70	2.11	49.90	12.30	1.84	0.59	4.84	7.71	533.33		
I974-6	16.40	2.70	66.50	0.83	8.55	n.d.	1.82	0.74	4.74	5.07	281.65		12.99
I974-7	20.70	3.80	76.20	2.59	7.60	1.02	2.17	0.88	4.77	7.39	295.13	15.59	
I974-7-1	2.53	2.42	11.10	0.06	0.06	0.01	1.31	0.27	3.77	n.d.	24.78		21.80
I974-8	17.10	2.62	70.00	1.12	4.32	n.d.	1.93	0.73	4.96	5.50	230.71	26.16	17.08
I974-9	19.80	3.38	76.40	2.02	6.12	0.05	2.06	0.80	5.02	6.69	276.55	20.51	2.70
I974-10	6.86	3.16	37.40	0.35	0.06	n.d.	1.79	0.60	4.00	0.26	109.06	3.24	24.00
I974-10-1	1.70	2.78	10.30	n.d.	0.01	0.02	1.32	0.17	4.90	1.56	6.83	28.81	63.60
I974-13	6.71	2.33	39.40	n.d.	0.03	n.d.	2.44	0.98	7.77	7.27	67.42	76.35	79.80
I974-14	17.60	2.53	70.40	1.43	1.89	n.d.	2.10	0.74	5.01	5.90	239.40	95.79	16.60
I974-15	17.00	2.48	69.00	1.30	1.63	n.d.	2.11	0.71	4.89	5.80	229.51	19.93	20.40
I974-15-1	16.00	2.59	64.80	1.18	0.88	0.01	2.06	0.74	4.88	5.24	216.03	24.49	28.70
I974-15-2	16.10	2.80	65.20	1.13	0.82	0.08	2.14	0.82	6.64	5.57	228.31	34.45	2.00
I974-15-3	15.80	2.75	63.60	1.12	0.80	n.d.	2.17	1.17	5.04	5.56	219.93	2.40	8.60
I974-16	16.20	3.07	64.40	1.15	3.01	1.25	2.14	1.23	3.94	4.14	235.81	10.33	
I974-16-1	31.70	9.87	63.60	2.51	175.00	57.80	4.25	0.95	4.77	n.d.	934.83		
I974-16-2	16.00	3.20	62.00	1.14	3.21	1.47	2.39	1.85	6.16	5.66	237.00		
I974-16-3	16.50	3.39	62.90	1.18	6.49	2.80	2.36	1.83	5.66	5.42	255.28		
I974-16-4	16.50	3.54	58.80	1.20	8.50	4.24	2.43	1.79	6.47	5.22	257.68		
I974-16-5	2.24	3.24	17.20	n.d.	0.02	0.01	2.03	0.32	5.65	n.d.	8.54		113.90
I974-17	16.40	3.67	54.80	1.19	7.95	4.11	2.67	1.71	7.75	5.32	257.08	136.72	
I974-17-1	17.00	3.60	54.30	1.52	7.01	3.38	3.04	1.74	6.02	5.28	255.58		
I974-18	17.20	3.71	53.70	1.52	7.13	4.14	3.93	1.62	8.03	5.44	257.38		
I974-19	9.40	3.38	32.50	0.67	2.33	1.37	3.26	1.65	7.01	6.11	132.13		
I974-20	3.65	3.04	15.00	0.31	1.49	0.26	2.32	1.37	7.42	5.44	53.33		1.40
WAF	4.1	-	15	-	0.67	0.4	6.3	2.3	7.8	-	11.2	57.4	

Ba은 폐탄광 배수에 의해 오염된 하천수나 세계 평균 담수 모두 별다른 함량 차이를 보이지 않아 폐탄광 배수로부터 유입되는 오염물질이 아님을 알 수 있다.

오염물질의 운반 형태 및 양

Table 5는 1996년 10월과 1997년 4월의 임곡천을 따른 하천수 내 부유물의 양과 화학조성을 정리한 것이다. Table 5로

Table 4. The minor dissolved component concentrations (mg/l) in the water samples collected from the Imgok creek

Sample No.	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Mo	Cd	Cs	Ba	Pb	Th	U
IO3	13.66	594.66	869.94	248.88	894.60	4.29	449.78	0.68	5.06	2.34	12.86	6.56	50.37	109.39
IO5	17.20	658.96	969.14	305.00	945.80	4.46	444.86	0.48	4.63	2.41	12.63	9.37	53.28	106.19
IO6	10.81	407.26	600.40	188.72	614.08	3.26	277.63	0.43	2.83	1.45	12.43	3.43	30.49	58.93
IO7	1.74	3.26	7.89	3.05	7.52	0.74	72.27	0.56	n.d.	n.d.	10.85	0.22	n.d.	0.52
IO8	8.51	311.94	453.49	140.57	449.24	2.55	233.44	0.39	2.25	0.99	12.91	2.24	20.83	42.37
IO9	4.11	154.86	239.02	74.86	245.76	1.65	151.21	0.27	1.09	0.51	12.45	1.19	6.90	19.55
IO10	1.46	37.16	58.01	7.66	50.31	1.20	132.10	0.23	0.32	n.d.	13.19	1.52	n.d.	1.73
IO14	2.93	117.69	188.44	58.06	193.49	1.63	149.21	0.26	0.84	0.39	14.85	1.45	3.54	16.11
IO15	2.32	100.30	159.47	47.71	168.18	1.52	142.86	0.39	0.83	0.36	14.60	0.90	2.47	13.80
IO15-1	1.97	83.83	134.22	38.69	140.35	1.45	137.17	n.d.	0.68	0.30	15.32	0.67	1.02	11.84
IO15-2	2.38	79.30	127.47	40.36	128.91	1.68	133.80	0.25	0.82	0.40	15.49	0.69	1.92	12.29
IO15-3	1.84	75.23	120.54	37.61	119.37	1.61	129.78	1.04	0.74	0.30	15.76	0.67	0.80	11.61
IO16	2.17	87.84	155.61	43.53	163.47	1.69	133.03	0.43	0.79	0.32	16.30	0.74	0.76	15.35
IO16-1	3.89	176.58	443.59	8.68	373.91	4.72	116.37	0.23	0.34	1.12	7.83	0.40	5.65	43.44
IO16-2	2.45	89.87	160.64	45.65	184.83	2.14	134.38	0.27	0.77	0.28	17.25	2.97	1.07	14.83
IO16-3	2.13	96.50	184.31	42.64	180.65	2.36	133.03	n.d.	0.67	0.36	16.75	0.70	1.83	17.06
IO16-4	2.22	91.14	174.31	40.27	175.87	2.28	129.12	n.d.	0.67	0.34	17.01	0.76	1.83	15.53
IO17	2.35	84.99	158.89	36.42	163.34	2.15	123.78	n.d.	0.63	0.31	16.34	0.71	2.01	14.78
IO17-1	2.19	85.00	155.01	106.67	230.96	3.21	127.94	0.21	17.02	0.33	17.24	0.72	0.41	6.52
IO18	2.12	81.70	149.30	33.97	156.95	2.25	119.66	n.d.	0.67	0.28	17.98	6.82	1.71	14.26
IO19	1.32	28.97	60.80	15.36	62.56	2.73	110.62	0.58	0.44	n.d.	24.25	0.69	0.14	4.11
IO20	1.13	12.38	27.75	12.96	24.03	2.72	86.76	0.35	0.20	n.d.	28.83	0.49	n.d.	1.32
I974-2	2.57	0.57	5.93	2.25	6.76	3.13	63.50	0.43	0.29	0.21	7.54	0.40	0.19	0.29
I974-3	15.40	411.00	652.00	200.00	446.00	5.86	436.00	0.51	2.91	2.10	13.30	9.94	65.30	72.10
I974-4	14.30	209.00	644.00	180.00	442.00	5.14	368.00	0.44	2.55	1.88	14.20	11.40	74.30	67.00
I974-5	2.69	106.00	174.00	41.60	121.00	2.41	148.00	0.35	0.71	0.34	11.30	1.32	0.98	10.20
I974-6	2.48	40.20	71.80	2.67	25.50	2.23	112.00	0.35	0.27	0.15	11.90	0.14	0.14	0.10
I974-7	2.19	99.20	119.00	25.10	80.60	1.69	151.00	0.34	0.78	n.d.	19.30	3.42	n.d.	4.64
I974-7-1	2.13	4.30	11.70	2.06	7.58	0.90	33.30	0.28	0.15	n.d.	6.79	0.27	n.d.	n.d.
I974-8	2.17	48.00	71.20	2.80	28.40	1.74	123.00	0.34	0.39	n.d.	15.30	n.d.	n.d.	0.16
I974-9	2.19	83.20	105.00	13.10	62.60	1.67	146.00	0.23	0.52	n.d.	18.50	0.21	n.d.	1.20
I974-10	2.46	14.70	35.40	2.11	13.60	1.70	114.00	0.23	0.21	n.d.	10.90	n.d.	n.d.	0.11
I974-10-1	2.61	0.67	5.01	3.45	9.25	0.95	41.40	0.26	0.14	n.d.	2.92	0.25	n.d.	n.d.
I974-13	2.99	0.79	5.65	1.60	3.53	2.04	86.70	0.27	0.15	n.d.	24.70	0.25	n.d.	n.d.
I974-14	2.10	58.80	75.30	2.48	33.60	1.58	134.00	0.23	0.43	n.d.	17.40	n.d.	n.d.	0.22
I974-15	2.39	55.00	71.60	2.48	27.40	1.61	127.00	0.24	0.43	n.d.	17.80	0.12	n.d.	0.24
I974-15-1	2.04	50.30	68.40	2.13	22.30	1.56	134.00	0.32	0.40	n.d.	17.70	1.74	n.d.	0.20
I974-15-2	2.24	49.70	72.00	8.94	36.40	1.60	126.00	0.22	0.30	n.d.	17.50	2.02	n.d.	0.9
I974-15-3	2.25	48.40	71.50	4.45	32.70	2.05	127.00	0.30	0.47	n.d.	18.20	n.d.	n.d.	0.20
I974-16	2.24	53.10	87.30	9.78	51.40	4.87	128.00	0.52	0.43	0.23	18.20	0.27	0.57	2.56
I974-16-1	4.69	189.00	519.00	5.01	275.00	6.35	135.00	0.30	0.33	1.38	8.75	0.50	4.57	39.50
I974-16-2	2.41	55.70	92.60	10.10	52.90	3.87	125.00	0.38	0.51	0.12	18.20	0.17	n.d.	2.42
I974-16-3	2.15	56.30	97.10	10.00	55.10	3.45	125.00	0.29	0.45	0.14	18.30	0.20	0.13	2.88
I974-16-4	2.41	57.30	104.00	11.30	61.40	3.13	118.00	0.29	0.34	0.15	17.30	0.45	0.14	3.77
I974-16-5	2.70	0.78	4.06	1.51	1.74	0.81	53.90	0.46	0.13	n.d.	1.24	0.85	0.31	n.d.
I974-17	2.39	55.80	101.00	11.90	61.30	3.05	115.00	0.21	0.32	0.16	17.90	0.79	0.12	3.89
I974-17-1	2.31	58.00	101.00	12.70	62.90	3.11	116.00	0.29	0.49	0.13	19.70	0.45	n.d.	4.21
I974-18	2.46	58.80	103.00	11.80	61.40	2.88	114.00	0.23	0.42	0.14	19.00	0.16	n.d.	4.24
I974-19	2.31	22.60	48.90	4.01	27.00	3.01	111.00	0.19	0.33	n.d.	22.60	0.31	n.d.	1.39
I974-20	2.33	10.40	27.50	6.95	11.70	2.80	86.40	0.24	0.17	n.d.	23.60	0.18	n.d.	0.30
WAF	1.00	0.10	0.30	7.00	20.00	1.00	70.00	0.60	-	0.02	20.00	3.00	0.100	0.04

부터 부유 고형물은 주로 Fe와 Al으로 구성되어 있는 물질임을 알 수 있다. 특이한 것은 가을에 채취한 부유 고형물 시료인 경우 Fe의 함량이 Al의 함량보다 높게 나타나는데 반하여, 봄

에 채취한 부유 고형물 시료의 경우에는 상류 부분을 제외하고 Al의 함량이 Fe의 함량보다 높게 나타난다는 것이다(Figure 6). 이는 하천수내의 용존 Fe와 Al의 함량과는 반대되는 현상

Table 5. Weights (mg/l) and chemical compositions (ppm) of the suspended solids in the collected water samples from the Imgok creek

Sample No.	weight	Al	Ca	Fe	Mg	K
IOS 8	33.6	271.84	19.63	634.85	5.96	44.78
IOS 9	53.0	168.56	11.78	636.78	2.50	29.57
IOS 14	41.6	48.42	6.00	560.00	1.11	18.32
IOS 15	31.2	344.85	22.37	682.06	4.23	65.15
IOS 15-1	40.8	230.94	14.75	601.44	4.19	34.19
IOS 15-2	29.6	43.56	5.20	631.69	1.30	15.31
IOS 15-3	26.8	159.30	14.61	618.75	2.11	65.86
IOS 16	30.8	142.92	10.97	394.68	1.69	47.34
IOS 16-2	22.4	227.23	18.94	1014.26	3.83	78.19
IOS 16-3	20.2	68.29	8.38	608.19	1.81	29.81
IOS 16-4	8.4	140.55	15.75	603.97	2.47	61.64
IOS 17	9.4	125.87	13.48	602.83	1.85	52.50
IOS 17-1	6.6	432.00	37.75	514.25	5.25	139.25
IOS 18	8.0	103.81	17.62	621.19	3.10	55.24
IOS 19	1.8	953.33	97.78	410.00	8.89	418.89
IOS 20	2.2	1045.38	99.23	191.54	10.00	323.85
IS74-3	233.5	99.36	4.09	524.63	1.46	19.64
IS74-4	370.4	84.64	4.31	542.66	1.97	14.71
IS74-5	18.8	133.51	13.35	436.17	5.96	23.24
IS74-6	8.0	243.75	60.25	310.00	18.50	57.75
IS74-7	4.7	158.51	14.47	346.81	2.55	67.02
IS74-8	6.5	96.00	5.08	33.08	1.23	31.08
IS74-9	3.0	360.00	18.67	145.00	3.33	74.00
IS74-14	3.6	361.11	24.72	251.67	3.89	91.39
IS74-15	4.2	352.38	21.43	254.76	3.33	88.81
IS74-15-1	4.3	348.84	24.88	244.19	4.19	86.05
IS74-15-2	7.1	190.14	8.45	164.79	2.11	22.25
IS74-15-3	5.3	288.68	13.96	161.51	2.45	59.25
IS74-16	5.9	342.37	13.73	141.19	2.20	67.12
IS74-16-1	0.9	867.78	78.89	144.44	13.33	344.44
IS74-16-2	5.7	249.12	7.37	161.58	1.40	35.96
IS74-16-3	7.3	272.60	8.49	156.16	1.64	42.47
IS74-16-4	3.7	408.11	18.11	184.32	2.70	105.68
IS74-17	4.4	384.09	16.14	174.77	2.50	85.91
IS74-17-1	4.9	228.57	7.55	140.61	1.63	30.61
IS74-18	3.6	305.56	16.67	145.28	2.78	64.72
IS74-19	2.2	423.18	26.82	106.82	4.55	153.64
IS74-20	1.0	1190.00	84.00	109.00	10.00	471.00

으로서, 임곡천의 하상을 피복하고 있는 황갈색 및 백색 침전물과 관련된 것으로 생각된다. 임곡천의 하상에서는 pH가 낮은 가을에는 전유로에 걸쳐 황갈색 침전물만이 관찰되며, 비교적 pH가 높은 봄철에는 중하류 부분에서 백색 침전물을 관찰할 수 있다. 이들 침전물에 대한 자세한 연구는 아직 진행 중에 있으나, Yu *et al.*(1996)에 의하면 황갈색 침전물은 철 황산염 수산화물(Fe-hydroxysulfate) 그리고 백색 침전물은 알루미늄 황산염 수산화물(Al-hydroxysulfate)이라 하였다. 그러므로, 부유 고형물의 대부분은 위와 같은 침전물이 침전될 당시의 입자들 혹은 이미 침전된 침전물들이 재부유된 것으로 구성되어 있다고 할 수 있다.

Figure 7은 임곡천수 내 총 용존 고형물(total dissolved solid; TDS, 이후부터는 간략하게 '용존물'이라 한다)의 양과 부유물의

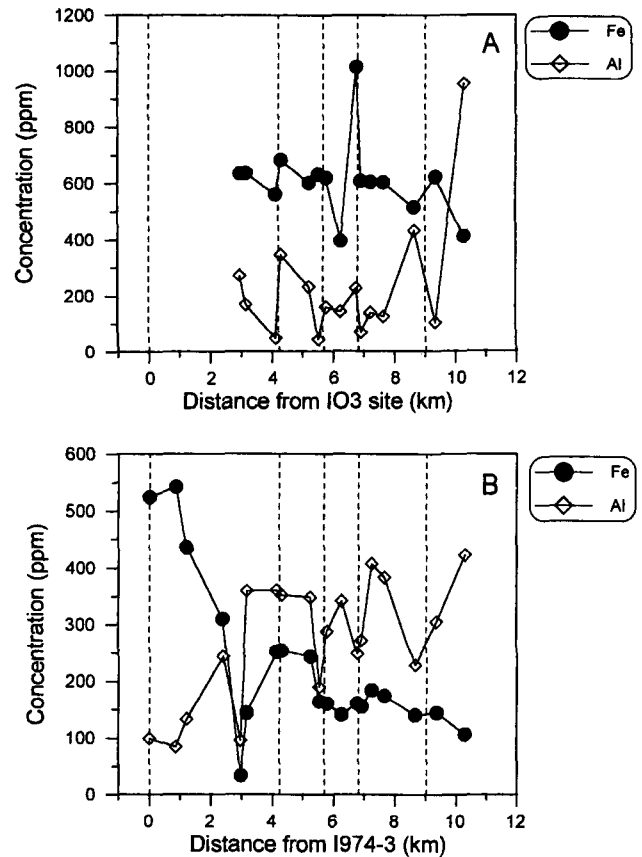


Figure 6. Variations in Fe and Al concentrations in the suspended solids along Imgok creek. A; October, 1996, B; April, 1997.

양을 비교하여 도시한 것이다. 이때, 용존물의 양은 분석된 하천수의 화학조성으로부터 이론적으로 계산한 것이며, 부유물의 양은 이미 기술한 바와 같이 측정된 값이다. Figure 7A와 7B는 1996년 10월의 경우로서, 각각 임곡천이 하루에 운반하는 용존물과 부유물의 총량 그리고 임곡천이 단위체적당 운반하는 용존물과 고형물의 양을 유로를 따라 나타낸 것이며, Figure 7C와 7D는 1997년 4월에 대한 같은 양들을 나타낸 것이다. Figure 7C의 경우 최초 유입되는 용존 고형물과 부유 고형물이 특이하게도 매우 높은 것으로 나타났는데, 이는 영동탄광 갱도충진 사업으로 인한 하천의 교란으로 생긴 결과이다. 1997년 4월 시료 채취 시기 이전부터 시료 채취를 할 때까지 석탄산업합리화사업단에서는 영동 탄광 배수에 의한 임곡천의 오염을 줄이기 위하여 영동 탄광 갱도를 석회암으로 충진하기 위한 사전 작업을 수행하고 있었다. 이 사전 작업은 기존의 갱도를 좀더 확장하여 충진 작업을 용이하게 하는 것이었는데, 그 결과 갱도내에 침전되어 있던 철 화합물들도 모두 다시 부유되며 비정상적으로 다량 유출되었다. 석탄 산업합리화사업단은 또한 그 당시에 1974-4 지점 주변에 하상 퇴적물을 긁어 올려 몇 개의 임시 저수댐을 설치하였는데, 이로 인해 부유물이 하류로 운반되지 못하여 임곡천 수 내 용존물과 부유물의 급격한 감소를 야기시켰다. 이러한 점을 감안한다면, Figure 7C의 비정상적으로 높은 초기 용존물과 부유물의 양은 인간에 의한 교란으로 생긴 일시

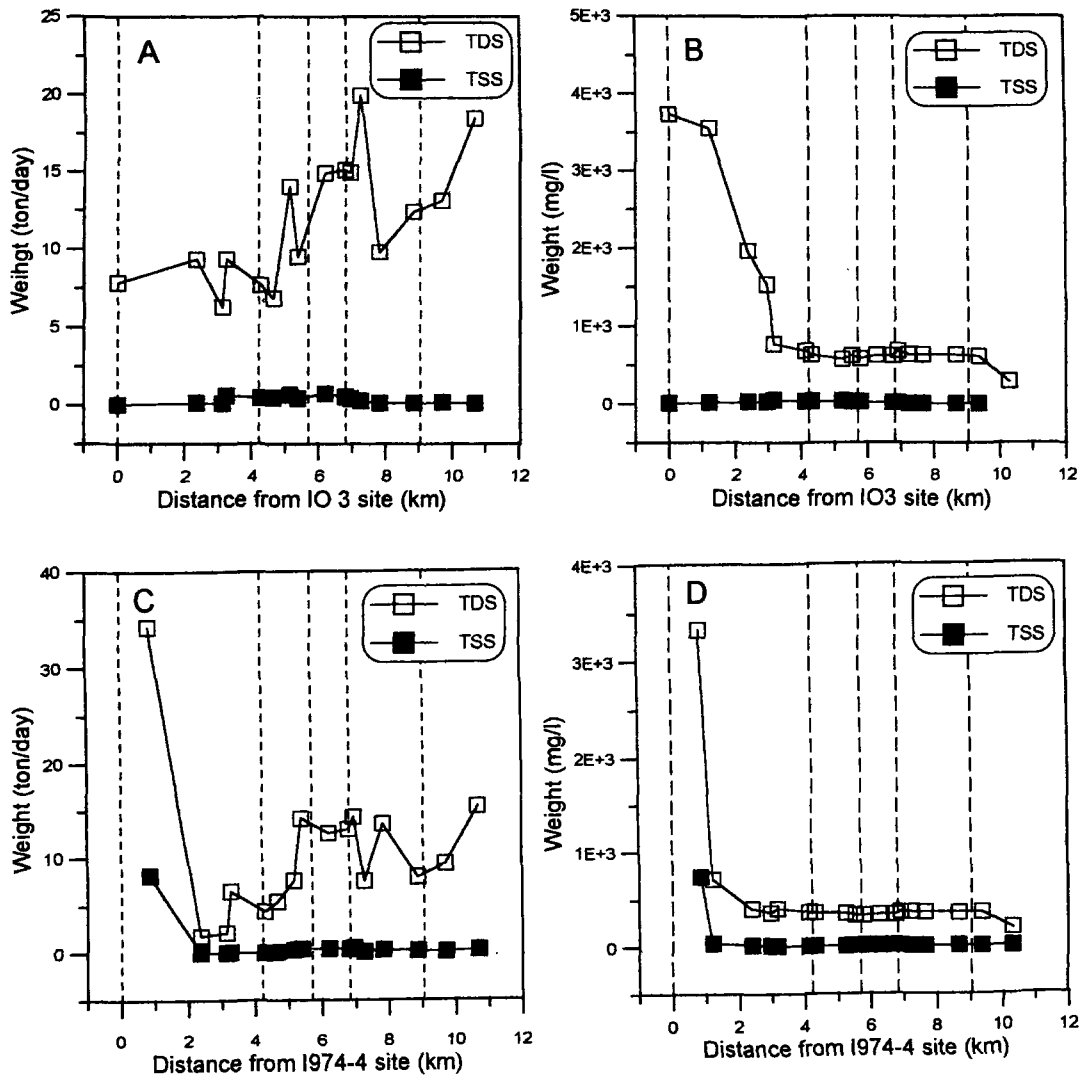


Figure 7. Comparison of the weights of the total dissolved solid (TDS) with those of suspended solid (SS) in the stream water along Im-gok creek. A, B; October, 1996, C, D; April, 1997.

적인 결과이며, 만일 이와 같은 교란이 없었다면 Figure 7A의 초기 변화양상과 크게 다르지 않을 것으로 생각된다.

Figure 7A와 Figure 7C는 전유로에 걸쳐 하루 동안 운반되는 부유물의 양은 어느 정도 일정한데 반해, 하루 동안 운반되는 용존물의 양은 하류쪽으로 갈수록 점차 증가하는 것을 보여준다. 한편, Figure 7B 및 7D는 단위 체적당의 용존물과 부유물의 양이 하류 지역에서 현저히 감소함을 보여주고 있다. 이들 자료를 토대로 보면, 임곡천에서 하루 동안 운반되는 용존물의 양이 하류로 갈수록 증가했다고 해서 하류쪽으로 오염 정도가 더 심해진 것이 아니라, 하류로 갈수록 오염 성분은 감소했으나 단순히 유량이 증가함으로써 용존물의 양이 증가하게 된 것일 뿐임을 알 수 있다. 따라서, 용존물의 운반량이 증가했다고 오염 정도가 반드시 증가한 것은 아니며, 반대로 단위 체적당 오염 물의 양이 감소했다고 오염물의 총량이 줄어든 것이 아니라는 점을 인식할 필요가 있다.

Figure 7B와 Figure 7D의 단위 체적 당 용존 고형물과 부유

고형물의 양 변화를 좀 더 자세히 살펴보면, 영동 탄광 배수 유입 지점으로부터 3 km 정도에 도달하기까지 용존 고형물의 양은 급격히 감소하며, 그 후 유로를 따라 약간의 증감만을 보이나, 부유 고형물의 양은 어느 정도 일정하게 유지되며 용존 고형물의 양에 비하여 그 양이 매우 적음을 알 수 있다. 이러한 결과는 탄광배수로부터 유입된 오염 물질은 주로 용존 고형물의 형태로 운반되며, 부유물로 운반되는 오염물의 양은 야외에서 걸보기와는 달리 많지 않음을 지시하는 것이다. Figure 7B와 7D는 또한 오염 물질들이 가장 하류에 도달해서는 침전 및 희석에 의하여 하천수로부터 제거된 결과, 임곡천 수의 수질이 주변의 오염되지 않은 하천수의 수질과 거의 비슷하게 됨을 나타내고 있다. 이러한 결과로 볼 때, 현재 탄광 배수가 임곡천, 특히 영동 탄광의 배수 유입 지점과 그로부터의 하류 몇 km의 지역을 심하게 오염시키고 있으나, 이 오염 물질이 모두 동해로까지 운반되어 동해를 심각하게 오염시키고 있다고 생각하기는 어렵다.

해수 및 해저 퇴적물

Table 6은 해수의 수질을 정리한 것이며, Table 7은 해수의 화학조성을 Livingstone(1963)이 제시한 세계 평균 해수(world average seawater: WAS)와 비교하여 나타낸 것이다. 해수 시료 내 폐탄광 배수로부터 유입되는 주요 오염 성분인 Mg, Fe, Al, Si, Ca, Mn 및 SO₄ 등의 함량은 세계 평균 해수의 함량과 별다른

차이를 보이지 않아 오염을 인지하기 어렵다. 이러한 결과는 실제로 탄광 배수에 의한 동해의 오염이 진행되었다고, 오염 물질의 양에 비해 해수의 양이 훨씬 많아 심한 희석으로 오염의 징후가 지워져 생긴 것일 수도 있다. 탄광 배수에 의한 오염의 징후는 해수보다는 해저 퇴적물의 화학 조성으로부터 더 쉽게 발견할 수 있을 것인데, 그 이유는 오염 물질이 바다에까지 도착해도 급격한 화학 조건의 변화로 인해 대부분 쉽게 침전되어 퇴적물과 함께 바닷물로부터 제거되기 때문이다.

Table 6. Field measurement data in the seawater samples from the study area

Sample No.	Date	pH	Eh (mV)	conductivity (μS/cm)
IO 21	October, 1996	8.24	335.08	36600
1974-21	April, 1997	7.95	297.38	38500
IS 1		8.32	294.37	36100
IS 2		8.35	266.72	37700
IS 3		8.36	262.58	37700
IS 4		9.29	260.10	42500
IS 5		8.48	242.75	38600
IS 6		8.45	239.10	37400
IS 7		8.44	247.68	37400
IS 8		8.39	245.89	37500
IS 9		8.38	245.05	38000
IS 10		8.41	254.19	37200

해저 퇴적물의 전암 분석(bulk analysis)의 결과는 Table 8에, 산으로 여과 시켜 여과액을 분석(leaching analysis)한 결과는 Table 9에 정리하였다. 그러나 이들의 함량만을 단순히 살펴보는 것으로는 폐탄광 배수에 의한 오염을 인지하기 곤란할 것이다. 오염 여부를 보다 정확히 인지하기 위해서, 입곡천의 하구로부터 오염물로서 공급된 가능성이 있는 성분들과 그렇지 않은 성분들의 분포를 Figure 8에 함께 나타내었다. 앞에서 전술한 바와 같이 Fe, Al, Mg 및 Pb 등은 폐탄광 배수로부터 공급되는 주요 오염성분이며, K과 Ba은 폐탄광 배수의 유입과는 관계가 없는 성분이다. 이들의 분포는 폐탄광 배수로부터 유입되는 오염 성분이든 그렇지 않은 간에 그 함량만이 다를 뿐 같은 분포 양상을 보인다. 만일 입곡천으로부터 유입된 Fe, Al, Mg 및 Pb 등의 오염 물질이 동해의 해저를 오염시키고 있다면, 이들은 오염

Table 7. The chemical compositions of the seawater samples collected from the study area

Sample No.	dissolved major component (mg/l)										
	Mg	Si	Ca	Fe	Al	Na	K	Cl	SO ₄	CO ₃	T-alk
IO 21	964	0.33	327.00	0.12	0.52	8200	350.00	8791	2104	128.56	107.10
1974-21	1392	0.39	389.00	0.03	0.04	3400	398.40	13382	2600	132.88	110.70
IS 1	1478	0.14	403.00	0.07	n.d.	4230	433.60	16232	2736	152.08	126.70
IS 2	1464	0.12	402.00	0.04	n.d.	3870	433.60	14158	2731	155.57	129.60
IS 3	1461	0.09	390.00	0.05	n.d.	3750	446.40	14579	2688	144.52	120.40
IS 4	1462	0.12	397.00	0.03	n.d.	3740	467.20	16127	2741	173.81	144.80
IS 5	1430	0.16	392.00	0.06	n.d.	3700	428.80	14243	2695	145.84	121.50
IS 6	1470	0.10	403.00	0.03	n.d.	3670	432.00	16255	2693	122.68	102.20
IS 7	1459	0.12	395.00	0.06	n.d.	3620	430.40	14201	2701	141.16	117.60
IS 8	1494	0.17	421.00	0.04	n.d.	3550	444.80	14440	2689	133.96	114.80
IS 9	1445	0.16	392.00	0.03	n.d.	3520	420.80	14237	2694	1363.96	111.60
IS 10	1419	0.16	289.00	0.04	n.d.	3540	414.40	14460	2704	145.48	121.20
WAS	1272	0.29	400	0.01	<0.01	10561	380	18980	2649	137.70	

Sample No.	dissolved minor component (μg/l)										
	Cr	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Cd	Ba	Pb	Th	U
IO 21	n.d.	n.d.	n.d.	148.76	99.28	6913	n.d.	93.72	n.d.	n.d.	n.d.
1974-21	67.00	120.00	44.20	103.00	48.40	7319	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
IS 1	n.d.	n.d.	15.40	n.d.	93.40	7449	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
IS 2	n.d.	n.d.	17.40	49.00	49.40	6929	n.d.	n.d.	53.50	n.d.	n.d.
IS 3	22.00	n.d.	73.20	1780.00	59.40	7349	n.d.	n.d.	107.20	n.d.	n.d.
IS 4	n.d.	n.d.	11.40	153.00	50.40	7699	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
IS 5	26.00	n.d.	17.50	n.d.	57.40	8169	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
IS 6	52.00	80.00	93.20	273.00	70.40	9619	n.d.	n.d.	43.10	n.d.	n.d.
IS 7	54.00	n.d.	110.20	228.00	64.40	8209	n.d.	n.d.	372.20	n.d.	n.d.
IS 8	41.00	53.00	89.20	443.00	49.40	7519	n.d.	n.d.	153.20	n.d.	n.d.
IS 9	42.00	76.00	49.20	n.d.	60.40	8099	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
IS 10	53.00		45.20	25.00	48.40	7569	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
WAS						13000					

Table 8. The chemical compositions (ppm) of sea sediment bulk samples in the East sea

Sample No	ISB 1	ISB 2	ISB 3	ISB 5	ISB 6	ISB 8	ISB 9	ISB 10
Fe	14150	15130	21200	19260	22190	7802	18910	26500
Mn	208.2	213.7	371.0	284.3	295.0	106.3	341.4	350.9
Mg	4436	5312	7234	6592	7276	2126	5616	9076
Al	81530	93360	82010	79430	90350	58910	79600	102100
Ca	11910	13160	15390	14300	15430	9354	13700	17590
K	38970	42650	37770	40510	42380	33830	37370	40200
Cr	11.130	12.814	12.299	11.925	14.400	5.726	15.080	19.321
Co	0.912	0.973	1.159	1.275	1.454	0.314	1.141	1.988
Ni	2.265	2.314	2.672	2.928	3.025	0.966	2.624	4.365
Cu	1.549	2.321	1.865	2.282	2.456	0.778	1.951	3.354
Zn	11.752	12.927	14.073	16.314	18.132	4.536	13.557	23.296
Rb	33.527	38.850	35.022	39.257	42.732	20.007	38.694	50.513
Sr	71.244	80.146	72.142	80.961	85.500	43.911	79.857	97.814
Cd	0.084	0.071	0.071	0.078	0.068	0.043	0.085	0.110
Cs	0.540	0.637	0.637	0.674	0.786	0.264	0.573	1.074
Ba	228.197	249.946	218.917	233.906	249.600	157.696	241.302	263.961
Pb	6.358	6.823	6.270	6.794	7.476	3.897	6.888	8.615
Th	1.420	1.524	2.441	1.961	1.788	0.744	2.463	2.779
U	0.281	0.265	0.438	0.383	0.369	0.144	0.426	0.493

Table 9. The chemical compositions (mg/l) of the leached fractions of the sea sediment in the East sea

Sample No	ISB 1	ISB 2	ISB 3	ISB 5	ISB 6	ISB 8	ISB 9	ISB 10
Fe	167.29	211.26	272.84	239.15	362.59	94.00	247.44	454.61
Mn	3.64	3.84	4.41	4.73	6.53	1.37	2.98	6.28
Mg	78.20	95.49	110.42	122.30	147.63	44.87	101.86	188.32
Al	85.13	109.83	132.21	133.19	184.54	40.37	114.78	234.39
Ca	185.61	193.94	172.32	371.85	323.19	92.52	178.38	450.56
K	39.00	48.53	56.94	63.87	71.82	20.88	49.24	88.09
Cr	0.1972	0.2347	0.2997	0.2715	0.3503	0.1098	0.2455	0.4390
Co	0.0892	0.0792	0.0866	0.0909	0.1186	0.0354	0.0785	0.1446
Ni	0.1185	0.1119	0.1217	0.1321	0.1530	0.0586	0.1163	0.2057
Cu	0.0687	0.0681	0.0774	0.1556	0.1087	0.0323	0.1975	0.1240
Zn	1.2537	1.1592	1.2038	1.3374	1.5287	14.7038	1.0310	1.7547
Rb	0.1990	0.2765	0.3253	0.3175	0.4351	0.1073	0.2939	0.5351
Sr	1.0350	1.1226	0.9552	1.7137	0.4351	0.6075	1.0116	2.0954
Cd	0.0014	0.0011	0.0023	0.0010	0.0025	0.0010	0.0011	0.0036
Cs	0.0068	0.0101	0.0125	0.0121	0.0151	0.0043	0.0110	0.0197
Ba	0.2817	0.3688	0.3825	0.3989	0.5122	0.1621	0.3549	0.5685
Pb	0.2940	0.3348	0.3849	0.3685	0.4378	0.1729	0.3547	0.4655
Th	0.0445	0.0501	0.0892	0.0730	0.0744	0.0377	0.1341	0.0994
U	0.0129	0.0146	0.0219	0.0202	0.0198	0.0079	0.0199	0.0221

과 관계가 없는 성분들과는 그 분포 양상에 있어 차이가 있을 것이다. 더욱이, 군선강의 하구로부터 동해 쪽으로 멀어질수록 오염 성분들의 함량이 오히려 더 증가하는 양상을 나타내고 있는데, 이는 폐탄광 배수로부터의 오염 성분들이 임곡천에 의해 운반되어 동해를 오염시키고 있지 않음을 여실히 보여주는 것이라 할 수 있다.

결 론

오염된 임곡천의 수질은 오염되지 않은 하천수 보다 더 낮은 pH와 높은 Eh, 그리고 매우 높은 전도도를 보이며, 유량이 많

은 봄철 보다 유량이 적은 가을철에 오염이 더 심화되어 있다. 폐탄광 배수에 의해 유입되는 오염 성분은 Mg, Fe, Al, Si, Ca, Mn 및 SO₄ 등의 용존 주성분과 Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Cd, Pb 및 U 등의 용존 부성분이다. 이들 오염 성분들은 임곡천으로 유입된 후 수 km 이내에서 상당량 급격히 제거되고 그 나머지가 계속 임곡천을 따라 하류로 이동해 간다. 오염 성분들은 용존물과 부유물의 형태로 임곡천을 따라 이동해 간다. 임곡천 수 내 부유물은 특히 높은 Fe와 Al의 함량을 갖고, 가을철의 경우 전유물에 걸쳐 Fe의 함량이 Al 보다 높고, 봄철의 경우 중하류에서는 그 반대의 현상이 나타난다. 그러나, 오염 성분은 이러한 부유물보다는 용존물의 형태로 대부분 임곡천을 따라

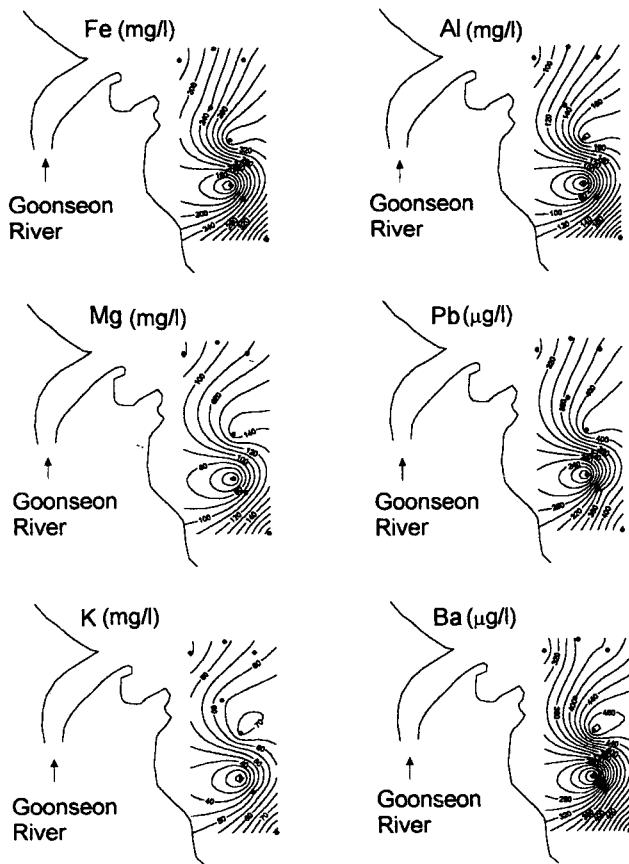


Figure 8. The pollutant (Fe, Al, Mg, Pb) and non-pollutant (K, Ba) distributions of the bottom sediment leaching samples in the East Sea.

이동하는데, 이는 전유로에 걸쳐 용존물의 양이 부유물의 양에 비해 현격히 많은 사실로부터 쉽게 짐작할 수 있다.

탄광 배수로부터 유래된 오염 물질이 현재 임곡천을 심하게 오염시키고 있기는 하지만, 임곡천을 따라 이동해 동해를 오염시키고 있다고 보기는 어렵다. 그 이유는, 임곡천 수 내 용존물 형태의 오염 성분들은 하류로 갈수록 점차 침전되어 회석되고 제거되어, 동해로 유입되기 전 최하류 지역의 임곡천 수가 갖는 오염 성분의 함량은 주변의 오염되지 않은 하천수 내의 이들의 함량과 거의 비슷해지기 때문이다. 이러한 사실은 임곡천이 유입되는 동해의 하구수 및 해수 내의 화학조성은 세계 평균 해수의 함량과 별 차이가 없으며, 해저 퇴적물내 오염물질들의 함량 및 분포에서도 오염의 증거는 발견되지 않는다는 점에서도 증명될 수 있다.

현재 동해가 탄광 배수에 의해 심하게 오염되지 않고 있다고 해서, 동해가 계속 오염으로부터 안전한 것은 아니다. 앞으로 임곡 지역의 오염 안된 지류들이 시간이 지나면서 하나 둘씩 탄광 배수에 의해 점차 오염되면, 임곡천의 오염 정도를 회석시키고 오염 물질을 침전 등을 통해 제거했던 깨끗한 지류들의 유입이 줄어들고, 그에 따라 오염 물질의 이동이 유로를 따라 더욱 확산되고 결국은 동해에까지 다다를 개연성은 아직 충분히 남

아 있다고 할 수 있다. 실제로, 임곡 지역의 지류들 중, 1996년에는 오염되지 않은 하천수를 유입시키던 것이 1997년에 들어 오염된 하천수를 유입시키는 경우가 늘어나고 있는 실정이다. 그러므로, 임곡 지역에서 현재의 탄광 배수에 의한 임곡천의 오염에 대한 대책을 세워야 할 뿐만 아니라, 아직 동해의 오염이 심각하지 않은 지금 앞으로의 오염 물질 확산에 따른 피해에 대한 대책 그리고 그 예방책을 시급히 세워야 하겠다.

사 사

이 연구는 1996년도 학술진흥재단의 공모과제(자유공모과제 번호: 01D0023) 연구비로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김진범, 1993, 광산 폐수 수용 하천의 금속 이온 평형에 관한 연구: 동남천 사례 연구. 석사학위논문, 강원대학교, p.157.
- 오대균, 김정엽, 전효택, 1995, 동해 탄광 주변 산성 광산 폐수와 하천 퇴적물의 지구화학. 자원환경지질, 28, p. 213-220.
- 유재영, 1994, 태백 지역 하천의 탄광 폐수에 의한 오염 - 오십천을 중심으로. 대한 지질학회 제 49차 정기 학술 발표회, 충남대.
- 이무성, 전서령, 나춘기, 정재일, 1996, 동진 금 은 동 광산 주변에 방치된 폐석의 환경적 영향, 자원 환경 지질, 29(1), p.45-55.
- 홍영국, 나현준, 1995, 대구 달성 중석 광산 폐수의 환경 지구화학적 특징 및 대책. 대한 지질학회 제 50차 정기 학술 발표회, 공주대.
- Appelo, C.A.J. and Postma, D., 1993, *Gepchemistry, Groundwater and Pollution*. Balkema, Rotterdam.
- Drever, J.L., 1988, *The geochemistry of natural waters*, 2nd Ed., New Jersey, Prentice Hall.
- Livingstone, D.A., 1963, *Chemical compositions of rivers and lakes*, USGS professional paper, 44DG
- Potts, P.J., 1987, *A handbook of silicate rock analysis*, 3rd Ed., Blackie.
- Wetzel, R.G. and Likens, G.E., 1991, *Limnological analysis*, 2nd Ed., New York, Springer-Verlag.
- Yu, J.-Y., 1996a, Pollution of Osheepcheon creek by abandoned coal mine drainage in Dogyae area, eastern part of the Samcheok Coal Field, Kangwon-Do, Korea. *Environmental Geology*, 27, p. 286-299.
- Yu, J.-Y., 1996b, Precipitation of Fe and Al compounds from the acid mine waters in the Dogyae area, Korea: A qualitative measure of equilibrium modeling applicability and neutralization capacity?, *Aquatic Geochemistry*, 2, p. 81-105.
- Yu, J., Cho, J., Heo, B. and Chang, H., 1996, Fate of the pollutants from the abandoned coal mine drainage along Imgok creek in Gangdong-myeon, Kangreung, Korea and meaning of Fe versus Al compound precipitation, Abstract, GSA Meeting, Denver.