

Assessment of Water Pollution by the discharged water of the Abandoned Mine

Hee Joung KIM, Jae E. YANG^{*}, Jai Young Lee^{**}
Beang Kil Park^{***}, Sang-il Choi^{****}, Sang Ho JUN

Department of Environmental Science, Kangwon National University

^{}Division of Environmental & Biological Engineering, Kangwon National University, Chunchon, Korea*

*^{**}Department of Environmental Eng., University of Seoul*

*^{***}Department of Environmental Lab., Co. of Woong Jin*

*^{****}Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University*

<요약문>

Several metalliferous and coal mines, including Myungjin, Seojin and Okdong located at the upper watershed of Okdong stream, were abandoned or closed since 1988 due to the mining industry promotion policy and thus disposed an enormous amount of mining wastes without a proper treatment facilities, resulting in water pollution in the downstream areas.

AMD and waste effluents from the closed coal mines were very strongly acidic showing pH ranges of 2.7 to 4.5 and had a high level of total dissolved solid (TDS) showing the ranges of 1,030 to 1,947 mg/L. Also heavy metal concentrations in these samples such as Fe, Cu, Cd and anion such as sulfate were very high. These parameters of AMD and effluents were considered to be highly polluted as compared to those in the main stream area of the Okdong river and be major pollutants for water and soil in the downstream area.

Pollution indices of the surface water at the upper stream of Okdong river where AMD of the abandoned coal mines was flowed into main stream were in the ranges of 16.3 to 47.1. On the other hand, those at the mid stream where effluents from tailing dams and coal mines flowed into main stream were in the ranges of 10.6 to 19.5. However, those at the lower stream were ranged from 10.6 to 14.9. These results indicated that mining wastes such as AMD and effluents from the closed mines were the major source to water pollution at the Okdong stream areas.

1. 서론

우리나라의 석탄산업이 대부분 이루어지고 있는 강원도 동남부지역은 1989년부터 1995년까지 석탄산업 합리화사업의 시행으로 경제성이 극히 미흡한 탄광 335개가 폐광되어 현재는 석탄 산업이 가장 활발하였던 1988년보다 약 93%가 감소하여 대부분 지역이 폐광 및 휴광 상태로 방치되어 있다.¹⁾ 이러한

휴, 폐광으로 인하여 주변지역의 환경이 오염되는 것은 물론, 광해의 원인이 되기 시작하였다. 광해 요소로는 폐갱구 및 광산폐기물 주변에서 유출되는 산성광산폐수와 폐갱도 및 폐채굴적의 붕괴로 인해 발생하는 지반 침하, 광산폐기물(폐석, 광미사 등)의 유실, 침출수 유출, 광미사의 비산 등이 있다. 특히 폐갱도와 광산폐기물(광재담)에서 배출되는 광산폐수는 중금속을 다량 함유한 폐수이지만 아무런 정화 과정 없이 그대로 주변 수계와 토양으로 유출되어 지표수를 비롯하여 지하수 및 주변토양환경을 오염시키고 있으며, 중금속을 다량 함유하고 있는 광미의 비산 역시 주변 수계와 토양 환경을 오염시키고 있다. 이러한 환경문제를 일으키는 산성광산폐수의 생성 원인은 황화광물과 황철석에 있는 황이 산화되면서 생성되는 황산기(SO_4^{2-})에 의한 것으로 설명될 수 있다. 황화물 중 광산폐수의 산성화에 가장 크게 기여하는 것은 황철석으로, 황철석은 대부분의 금속 광상에 흔히 관찰될 뿐만 아니라, 탄층 내에도 상당량 포함되어 있는 광물이다. 이러한 황철석의 산화는 무기적으로도 진행되지만, 미생물에 의해서도 진행된다.^{2,3,4)} 황철석의 산화에는 황을 산화시키는 것과 철을 산화시키는 미생물들이 모두 기여할 수 있는데, 이러한 미생물들로는 *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus novellus*, *Thiobacillus acidophilus*, *Sulfurilobus acidocaldarius*, *Leptospirillum ferrooxidans* 등이 있으나 이 중 *Thiobacillus ferrooxidans*는 황과 철을 모두 산화시킬 수 있을 뿐만 아니라 비교적 다른 미생물들에 비해 번식력이 강해 광산폐수의 산성화에 가장 크게 기여하는 것으로 잘 알려져 있다. 이러한 광산폐수는 하천 및 지하수에 유입됨으로써 철 수산화물의 침전에 따른 하상 및 그 주변 경관의 훼손, 수질의 악화와 그에 따른 하천수 및 지하수 이용의 제약, 그리고 수서 생태계 파괴 등과 같은 환경 문제를 야기시킨다. 또한 광산폐수의 유입으로 인한 용존 물질의 증가는 물의 경도와 황산기의 농도 및 중금속의 함량 등을 높이는 문제를 야기시킨다. 따라서 광산폐수에 대한 오염도 평가와 정확처리가 요구되고 있다. 그러나 광산폐수에 함유된 오염물질의 물리적 화학적 특성이 매우 복잡하기 때문에 산성폐수에 의해 오염된 지표수나 지하수의 오염정도를 지역적, 시간적 변화에 따라 비교하는 일은 쉽지가 않다.

본 연구에서는 명진탄광, 서진탄광, 상동광산, 폐광 주변의 광재담, 옥동광산 등과 인접해 있는 옥동천을 대상으로 광산활동에 의해 발생한 광산폐수의 오염정도를 규정할 수 있는 pH, 황산염(Sulfate), 철, 알루미늄, 망간, 구리 및 아연함량 등의 변수를 조사하여 P. I.(pollution index)를 이용하여 하천수 오염지표(Water Pollution Index, WPI)를 도출하고, 옥동천에 유입되는 각 지류의 오염도를 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지점

시료의 채취는 광산 폐기물의 이동 경로에 따른 수질오염 연구를 위하여 수질시료를 1997년 9월 13일부터 19일, 1998년 7월 10일부터 17일까지 2회에 걸쳐 채취하였으며, 채취지역 설정방법은 옥동천 상류의 폐탄광지역과 휴광상태인 금속광산을 상류지역으로 설정하고, 중류지역은 신광재담, 구광재담 하류지역을, 하류지역은 옥동천이 남한강 상류와 합류되는 지역을 선정하여 옥동천 수계를 따라 상류에서 하류까지 29개 지점으로부터 광산 및 수계의 분포를 바탕으로 본류와 지류에서 각각 선택하여 등간격으로 시료를 채취하였으며 휴·폐광 유출수나 오염이 안된 지류가 유입되는 지점에서 상·하류 모두를 채취 하였다. 시료의 특성(table 1)과 시료채취지점은 Fig. 1에 두었다.

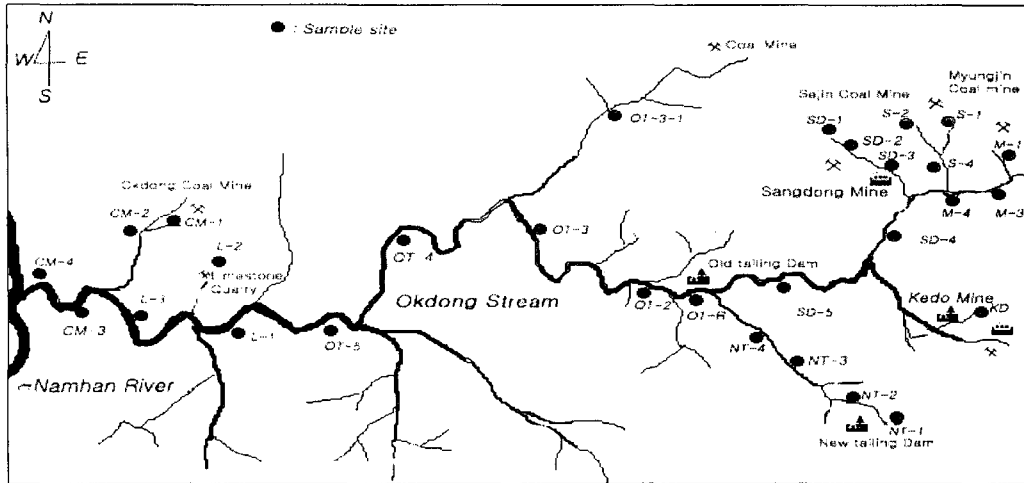


Fig. 1. Location map of water samples in the study area.

2.2. 화학분석

온도, DO(dissolved Oxygen), pH, EC, TDS는 시료채취 현장에서 Environmental Monitoring System (YSI 600DM)을 이용하여 측정하였으며, Fe, Al, Mn, Cu, Zn 등의 중금속과 SO_4^{2-} 는 각각 ICP (Australia Latam '8440)와 IC(Dionex)를 이용하여 실험실에서 측정하였다.

Table 1. Descriptions of water & sediment samples.

Sample i.d.	Water & sediment sampling locations	Site characteristics
M-1	Myungjin abandoned coal mine	Abandoned coal mine waste water
M-2	Myungjin abandoned coal mine	Abandoned coal mine waste water(Yellow boy)
S-1	Sejin abandoned coal mine	Abandoned coal mine waste water(Yellow boy)
S-2	Sejin abandoned coal mine	Abandoned coal mine waste water(Yellow boy)
SD-1	Sangdong mine	Discharge water
SD-2	Sangdong mine	Sangdong mine outlet water
KD	Kedo mine	Kedo mine outlet water
NT-1	New Tailing Dam	Discharge water
NT-2	New Tailing Dam	Tailing Dam waste water
OT-1	Old Tailing Dam	Tailing Dam waste water
OT-R	Old Tailing Dam	Tailing Dam waste water
OT-2	Old Tailing Dam	Tailing Dam waste water
OT-3	Old Tailing Dam	Tailing Dam waste water
OT-3-1	Coal mine(No named)	Abandoned coal mine waste water
OT-4	Mid stream	Surface water
L-1	Midstream	Surface water
L-2	Lime stone mine	Lime stone mine waste water
CM-2	Okdong abandoned coal mine	Abandoned coal mine waste water
CM-4	Down stream	Surface water

P. I.(pollution index)를 이용한 하천수의 오염도 평가(WPI; Water Pollution Index)

하천수의 오염도 평가는 Scottish Development Department에서 1976년에 제시한 “water-quality index(WQI)”를 기초로 하여 국내 폐탄광 산성폐수의 특성을 가장 잘 나타낼 수 있는 7개의 변수 즉,

pH, 황산염(Sulfate), 철, 알루미늄, 망간, 구리 및 아연 함량을(최우진, 1997) 토양오염도 평가에 사용되는 오염지수(Pollution Index; PI)(Kloke, 1979) 식에 대입하여 이용하였으며(식 1), tolerable level(mg/l) 값은 U.S. EPA.(Environmental Protection Agency)와 EEC(European Economic Community)기준치 및 음용수 수질기준에서 제시한 값을 이용하였다.

$$WPI = \frac{\sum \frac{\text{Heavy metal concentration in water}}{\text{Tolerable level}}}{\text{Number of heavy metal}} \quad (1)$$

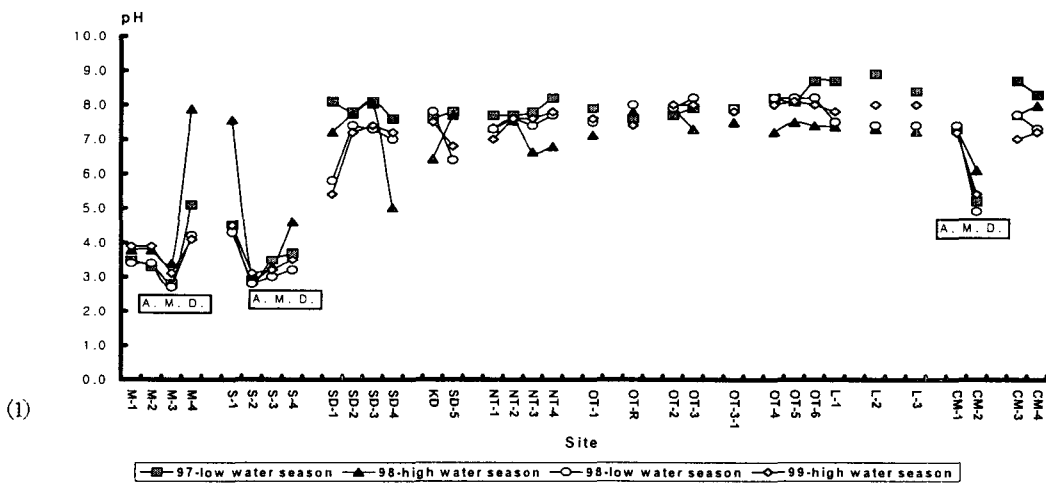
식 1에 의해 계산된 오염지수(WPI)는 각 중금속의 허용 한계 치에 대한 비를 평균한 것이므로 조사 지역의 오염지수가 1보다 크면 하천의 표층수기 산성광산배수(Acid mine drainage)에 의해 오염이 된 것으로 평가할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 이화학적 특징

옥동천 본류와 지류의 pH는 2.7~8.9로 나타났다. 석탄합리화 사업 이후 폐광된 서진탄광과 명진탄광의 폐갱구에서 침출되어 지류로 유입되는 지역의 정점 S-2에서 가장 낮은 pH 2.7을 나타냈다(Fig. 2).

폐탄광 침출수가 유입되어 광산폐수의 영향을 받는 지점에서 pH가 낮은 것은 석탄광에서 맥석광물로 존재하는 황철석이 산화되면서 다량의 수소이온(H⁺)을 수계로 방출하기 때문이다.¹¹⁾ 그 외의 정점에서는 하류로 이동함에 따라 pH가 증가하는 것으로 조사되었는데, 이는 산성인 광산폐수가 본류와 합쳐지면서 그 산도가 점차 희석되었기 때문이며, 또한 본 하천 유역의 지질이 석회암지대이기 때문으로 판단된다. 하류로 이동함에 따라 하천수 중의 수소이온(H⁺)과 옥동천 수계의 기반암인 석회암의 상호작용으로 인해 발생된 칼슘이온(Ca²⁺)과 중탄산이온(HCO₃⁻)은 하천수의 Alkalinity와 칼슘이온(Ca²⁺)의 농도를 증가시키는데,⁶⁾ 실제로 본류지역의 정점 MS-2, MS-3, MS-4에서는 pH 7.4~7.8으로 중성 내지 약알칼리성을 나타내었다.



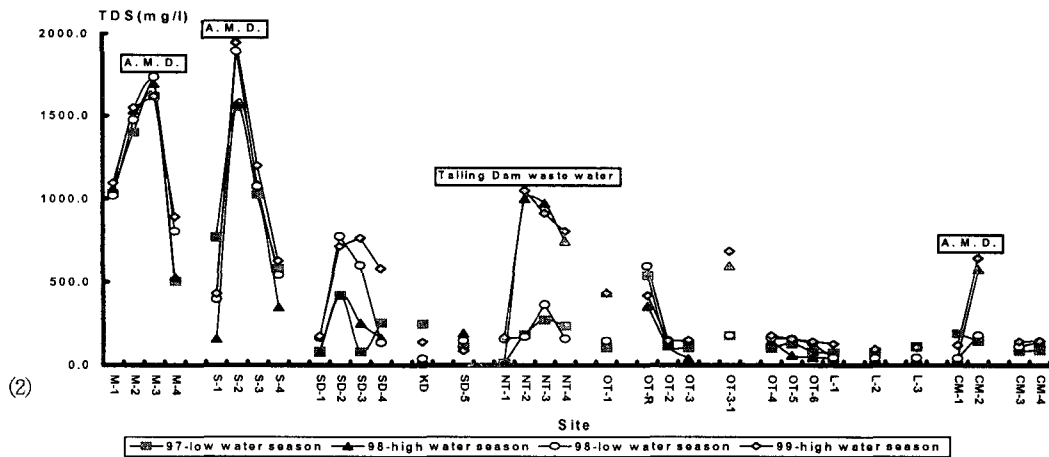


Fig. 2. pH (1) & Total dissolved solid (2) of surface waters in study area.

3.2. 옥동천 음이온의 농도 분포

연구대상지역에서 분석된 음이온의 함량은 황산이온의 경우 pH가 낮은 폐탄광의 산성광산배수지역이 매우 높게 측정되었으며 중 탄산이온은 석회광산지역의 배출수에서 가장 높은 농도를 나타냈다.

옥동천 상류지역부터 하류까지 음이온의 함량 변화를 통하여 원소별 오염정도를 알아보았다. 갈수기와 풍수기에 채취한 갯내수 및 침출수, 배출수, 하천수에 대한 음이온 농도분포는 Fig. 4에 나타내었다.

1) SO_4^{2-}

옥동천 본류와 지류 표층수에 함유된 황산이온의 총 농도는 9.0~2,747.0mg/l로 나타났다(Fig. 3).

이들 자료를 토대로 갈수기 황산 이온의 농도 변화를 보면 옥동천 상류에 위치한 서진 탄광의 폐갱구에서 침출수가 배출되는 정점 S-2에서 가장 높은 값인 2,747.0mg/l로 나타났으며, 상동광업소에서 발생된 광미의 투기 장소인 신광채담 상류의 계곡수로 비교적 오염이 되지 않은 곳으로 사료되는 정점 NT-1에서 가장 낮은 값인 15.0mg/l로 나타났다.

풍수기는 갈수기 보다 높게 나타났는데 이것은 우기에 형성된 수량의 증가로 예측된다.

2) HCO_3^-

옥동천 본류와 지류 표층수에 함유된 중 탄산이온의 총 농도는 14.0~ 351.4mg/l로 나타났다(Fig. 3).

이들 자료를 토대로 갈수기 중 탄산 이온의 농도 변화를 보면 석회광산의 배출수가 유입되는 정점 L-2에서 가장 높은 값인 351.4mg/l로 나타났으며, 옥동 폐탄광의 침출수가 유입되는 CM-2에서 가장 낮은 값인 21.5mg/l로 나타났다.

풍수기 농도의 변화를 보면 석회광산의 하류 지역인 정점 L-3에서 248.2mg/l로 가장 높은 값을 나타냈고 옥동천 상류의 서진 탄광 지역의 정점 S-1에서 가장 낮은 8.2mg/l로 나타났다.

중금속 (Fe, Al, Mn, Zn, Cu)

Fig. 4는 옥동천 본류와 지류 표층수에 함유된 Fe, Al, Mn, Zn, Cu의 총 중금속 농도를 나타낸 것이다. 일반적으로 광산지역의 하천에는 중금속의 천연부존량이 높은 편이며, 광산활동에 의해 발생하는 중금속도 많은 것으로 알려져 있다.^{13,14)}

옥동천 본류와 지류 표층수에 함유된 철의 총농도는 16.0~5757.0mg/l로 나타났다. 철의 총농도는 명진탄광의 폐갱구에서 배출되는 침출수가 유입되는 정점 M-3이 가장 높았으며, 신광채담 상류 계곡의 지하수에서 배출되는 유입수인 정점 NT-1이 가장 낮았다.

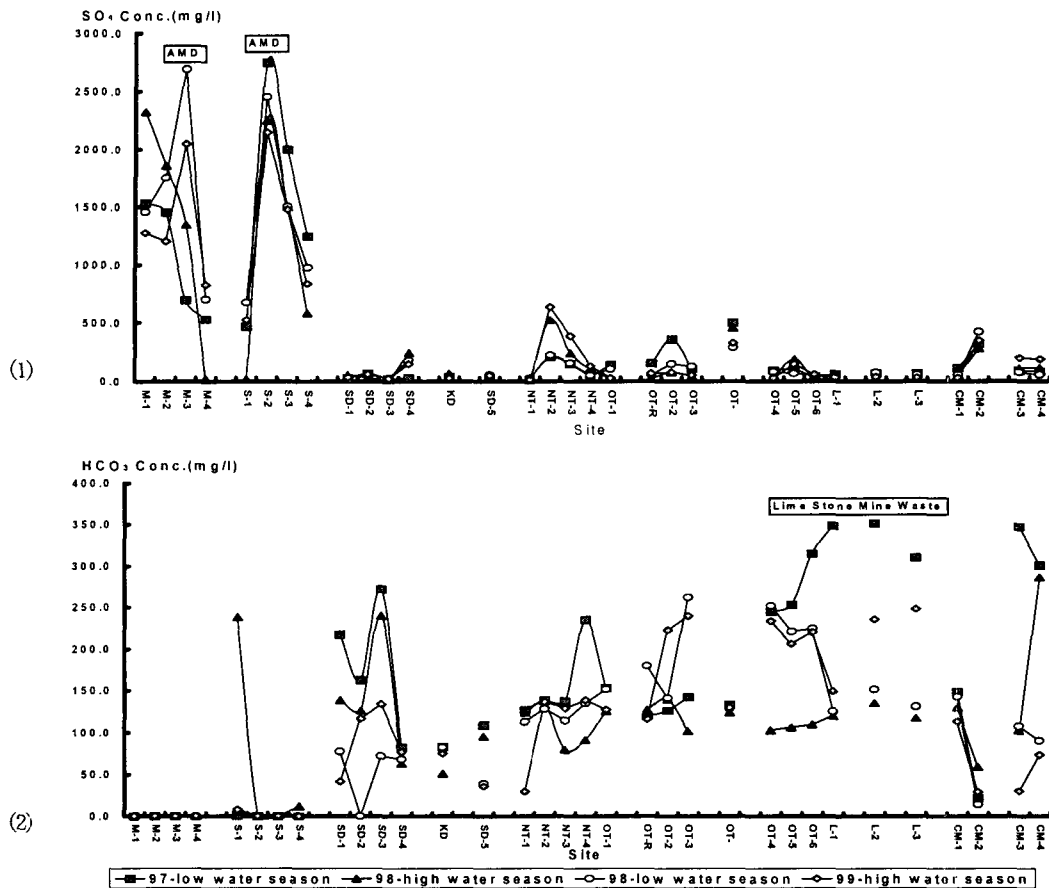


Fig. 3. Concentration of SO_4^{2-} (1) and HCO_3^- (2) of surface waters in study area.

신광재담과 구광재담 지역의 침출수의 경우 광미에서 발생되는 침출수임에도 철의 농도가 낮은 것으로 조사되었는데, 이는 침출수의 pH가 7이상이기 때문에 대부분의 철이 침전되어 수중의 철 농도가 낮은 것으로 판단된다.

옥동천 본류와 지류 표층수에 함유된 알루미늄의 총농도는 3.0~3061.0mg/l로 나타났다. 알루미늄의 총농도는 탄광폐수와 금속광산폐수가 유입되어 합류되는 지역의 정점 SD-3에서 3061.0mg/l로 가장 높았으며, 구광재담 침출수가 배출되는 정점 OT-R에서 3.0mg/l로 가장 낮았다. 알루미늄의 총농도는 비교적 pH가 낮은 강산성 환경에서 높은 함량을 나타내었는데, 이는 강산성 환경에서 물과 알루미늄을 함유하고 있는 광물 (K-feldspar, Biotite, Muscovite, Buergerite)과의 상호작용에 의해 다량의 알루미늄 이온이 하천으로 유입된 것으로 사료된다.^{13,14)} 이러한 작용이 점차적으로 하류로 내려올수록 pH의 증가로 $\text{Al}(\text{OH})_3$ (amorphous) 입자태를 형성하게 되어 수층에 존재하면서 이온형태의 농도는 감소하는 반면 입자태의 농도는 증가되어 총농도는 높은 경향을 보인다 하류에 이르러 퇴적으로 인하여 농도가 낮아지는 것으로 사료된다.

옥동천 본류와 지류 표층수에 함유된 아연의 총농도는 0.6~8.1mg/l로 나타났다. 특히 탄광폐수지역의 정점 OT3-1에서 가장 높은 8.1mg/l를 나타낸 것은 광산활동이 중단된 후에도 강산성 환경에서 물과 아연을 함유한 광물과의 화학적 반응이나 미생물 활동에 의해 아연 이온이 용해되어 하천으로 유입된 것으로 사료된다.

옥동천 본류와 지류 표층수에 함유된 구리의 총농도는 0.1~8.6mg/l로 나타났다. 구리의 총농도는 구광재담 침출수가 배출되는 광산폐수가 유입되는 정점 OT-2에서 8.6 mg/l로 가장 높은 함량을 나타내었다. 정점 OT에서 배출되는 유입수의 농도가 높은 것은 선광시 사용된 시약의 영향으로 사료된다.

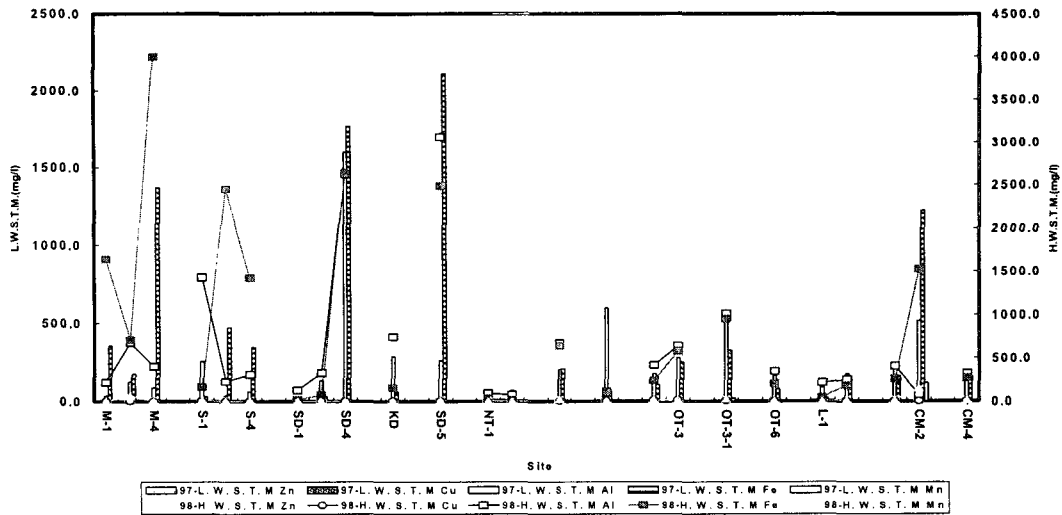


Fig. 4. Total metal of surface waters in study area.

3.3. W.P. I.(Water Pollution Index)를 이용한 옥동천 지류와 본류의 오염도평가

가) 오염물질 배출허용기준을 기초한 오염도평가

갈수기의 W.P.I. 값은 비교적 오염이 되지 않은 곳으로 사료되는 상동광업소지역의 상류인 정점 SD-1에서 1.0으로 가장 낮은 수치로 배출허용기준치에 가장 근접한 값을 나타냈다. 가장 높은 수치는 71.2를 나타낸 정점 SD-4로 이 지역은 폐탄광에서 배출되는 지류와 상동광업소의 배수 및 침출수가 합류되는 지역으로 옥동천 본류에 산성광산배수에 의한 오염원의 대부분이 이 지역에서 기인되는 것으로 사료되어 본류의 오염도 증가에 커다란 영향을 줄 것으로 예상된다.

풍수기는 갈수기와는 다르게 대부분의 지류에서 W.P.I.의 상승을 나타냈으며 특히 폐탄광이 갱내수 및 배출수가 산재해 있는 상류지역에서 적게는 1.5배에서 많게는 약 5배정도 상승하는 값으로 나타났다(Fig. 5).

전 기간 동안 명진 및 서진 폐탄광의 산성광산배수가 유입되는 지류가 포함되어 있는 상류의 P.I.가 16.3~47.1을 나타내고 있는 반면에 구광재댐과 신광재댐 및 폐 탄광의 배출수가 유입되는 중류에서 10.6~19.5를, 옥동 폐탄광의 침출수와 현재 가행되고 있는 석회광산의 배수가 합류되는 하류의 평균값인 10.6~14.9를 보여 상류지역의 폐탄광의 산성광산배수가 옥동천의 주 오염원을 것으로 사료된다.

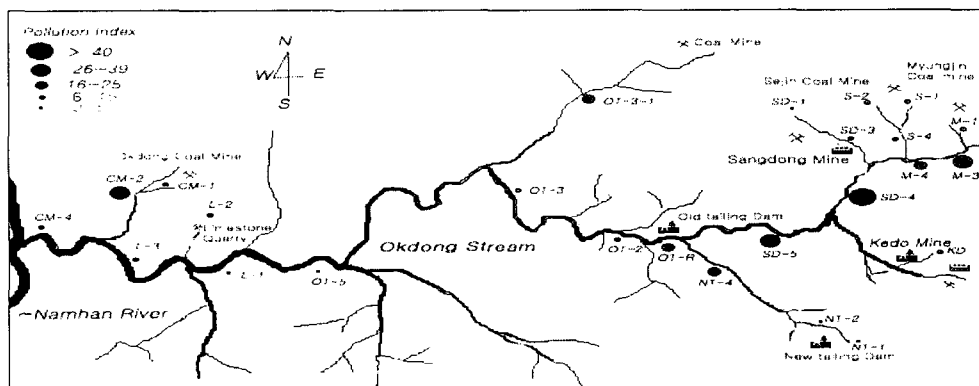


Fig. 5. Pollution index map of surface waters in study area in '98' high water seasons.

4. 결 론

옥동천 유역에 분포하는 명진, 서진, 옥동탄광 등의 폐탄광과 상동광업소, 거도광산 등의 금속광산, 광미폐재를 적치해 놓은 광재댐의 주변지역을 대상으로 갯내수, 하천수에 의한 오염현황을 파악하고 토의한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

● 옥동천 수질에 영향을 나타내는 가장 중요한 요인은 폐탄광의 갯내수 및 침출수의 낮은 pH로 이로 인한 수생태계가 가장 큰 영향을 받을 것으로 예상된다.

● 옥동천 상류지역은 대부분이 폐탄광의 갯내수 및 침출수가 배출되는 지역으로 본류의 오염도 증가에 커다란 영향을 줄 것으로 사료된다.

● Water Pollution Index는 폐탄광지역의 갯내수와 침출수에서 높게 나타나 우선 복원이 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 광산물 수급현황. 1997. 통산산업부
2. Stumm, W., and J.J. Morgan, 1981, Aquatic chemistry: New York, Wiley-Interscience, p.780
3. Murr, L.E. and Mehta, A.P.(1982) Coal desulfurization by leaching involving acidophyllic and thermophyllic microorganism. Biotech. Bioeng., 24, 743-748.
4. Bigham, J.M., U. Schwertmann., L. Carlson and E. Murad, (1990) A poorly crystallized oxyhydroxysulfate of iron formed by bacterial oxidation of Fe(II) in acid mine waters, Geochim. Cosmochim. Acta Vol.54, pp.2743-2758