

석산개발 사례를 이용한 주변 지역의 중금속 오염분석 및 대책방안에 관한 연구

A Study on Countermeasure and Contamination Analysis for Heavy Metal Pollution of Nearby Area using Stony Mountain Field Case

한 중근 ¹	Han, Jung-Geun	윤 원 일 ²	Yoon, Won-il
이 양 규 ³	Lee, Yang-Kyu	이 종 영 ⁴	Lee, Jong-Yuong
홍 기 권 ^{5*}	Hong, Ki-Kwon		

ABSTRACT

This study is described in heavy metal pollution by the stony mountain development using field case. The heavy metal pollution is investigated for nearby area(soil and stream) of the developed stony mountain, and then the countermeasure using contamination analysis is suggested. The investigation result indicated that contamination of Sammak stream caused by the stone dust and leachate at the stony mountain development. Therefore, the heavy metal pollution is evaluated by using Pollution Index(PI). The evaluation results confirmed that the contaminated groundwater was the leading cause of the contamination in Sammak stream and nearby soil. Therefore, the Permeable Reaction Barrier(PRB), which has a environmentally-friendly reactant, should be applied to control a heavy metal of groundwater, and it will be a reasonable countermeasure.

요 지

본 연구에서는 현장사례를 이용하여 석산개발이 주변 지역에 위치하는 토양 및 하천의 중금속오염에 미치는 영향을 분석하였으며, 분석결과를 바탕으로 중금속오염에 대한 대책방안을 제시하고자 하였다. 석산개발 부지 인근의 하천 및 토양의 중금속오염 조사결과, 석산개발로 인하여 발생된 미세석분 및 침출수가 삼막천으로 유입되면서 오염을 초래한 것으로 분석되었다. 또한 석산개발 주변지역의 중금속 오염도에 대하여 오염지수를 이용하여 평가한 결과, 오염된 지하수가 삼막천 오염의 주원인인 것으로 분석되었으며, 토양의 중금속오염은 오염된 지하수가 삼막천에 유입되어 중금속이 삼막천 하상에 퇴적된 것으로 확인되었다. 따라서 삼막천 오염의 주원인인 지하수에 대한 중금속 제어는 환경친화적인 반응물질이 적용된 투수성 반응벽체(PRB, Permeable Reaction Barrier) 시스템을 통하여 수행하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

Keywords : Heavy metal pollution, Stony mountain, Contamination analysis, Pollution Index(PI), PRB(Permeable Reaction Barrier)

1. 서 론

각종 건설공사에 있어서 골재는 필수적으로 사용되는

재료로서, 최근 사회간접자본의 확대에 인하여 수요가 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 이와 관련하여 국내에서는 강자갈 및 강모래 등과 같은 천연골재를 주로 사용하

- 1 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Chung-Ang Univ.)
- 2 학생회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 석사과정 (Student Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang Univ.)
- 3 비회원, 대림대학 공학계열 토목환경과 교수 (Non-Member, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dae-Lim College)
- 4 정회원, 중앙대학교 공과대학 그린테크연구소 전임연구원 (Member, Researcher, Grobal Greenization Technology Institute, College of Engineering, Chung-Ang Univ.)
- 5* 정회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 박사수료 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang Univ., E-Mail: kkhong@wm.cau.ac.kr)

였지만, 최근 4대강 개발시기를 제외하면 현재 그 사용 가능량은 크게 감소하였다. 따라서 골재를 안정적으로 공급하기 위하여 석산개발에 의한 쇄석골재 사용이 증가하였으나, 무분별한 개발에 따른 수질 및 토양오염뿐만 아니라 폐기물 발생 등과 같은 각종 환경피해가 증가되고 있다(김종우, 2001; 마호섭, 2004). 또한 석산개발이 완료된 채석장의 환경친화적인 복원이 사회적으로 중요한 문제로 대두되고 있는 실정이다. 이와 같은 사회적 요구를 만족시키기 위하여 최근에는 폐석산의 사면을 이용하여 조각타운을 조성하거나, 훼손된 암반에 토양기반을 조성하여 자연복원을 시도한 사례가 있다. 또한 석산 개발지에 교육시설, 생태공원 및 운동시설 등을 유치하여 적극적으로 활용하고 있다.

한편, 채석과정 및 개발종료후 미복원 부지로 부터 발생하는 미세석분 및 침출수 등은 인근 지역의 토양뿐만 아니라 하천유입을 통하여 인접수계의 중금속오염의 원인이 된다. 중금속오염은 토양 및 인접수계에 서식하는 동·식물의 중금속 중독을 야기하며, 다양한 자연기능을 저하시키는 주요원인이라 할 수 있다. 따라서 석산개발과정 및 개발 후 중금속오염 방지를 위한 대책방안 및 지속적인 유지관리가 필요하다.

본 연구에서는 경기도 안양 OO지구 석산개발완료 부지를 사례현장으로 선정하여 석산개발이 중금속오염에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이에 사례현장의 주변수계로 인접해 있는 안양천 지류인 삼막천과 주변지역 토양의 중금속 오염도를 분석·평가하였다. 수질오염도 평가는 석산개발 부지 인근의 OO대학 우수지 연못, 삼막천 상류 및 중류지역 등의 5개 지점에 대하여 수행하였으며, 토양오염도의 경우에는 석사 절개지 및 OO대학 부지 내 등의 총 8개 지점을 선정하여 실시하였다. 또한 오염도 분석결과를 바탕으로 석산개발에 의한 수변수계 및 토양의 중금속오염에 대한 대책방안을 제시하고자 하였다.

2. 사례현장 특성

2.1 지형적 특성

연구대상 현장은 안양시 일대로 면적은 약 220,000m²이며, 절개지 비탈면의 높이는 최대 약 140m, 연장은 약 300m 정도로서, 그림 1에서 보느냐와 같이 석산개발 부지 동측으로 삼막천이 흐르고 있다. 본 현장은 1976년부터

1993까지 약 15년간 골재 채취장으로 사용되었으며, 1995년부터 1998년까지 정리복구 사업이 완료되어 현재는 교육시설이 건설되어 있다. 그러나 정리복구 사업 이후부터 삼막천의 오염문제가 지속적으로 발생되어 대책방안이 필요한 실정이다.

삼막천은 안양천의 지류하천 중 하나로서, 안양천의 지리적 특성은 다음과 같다. 안양천은 서울을 관류하는 한강의 제1지천으로서 상류인 의왕시의 왕곡천부터 하류인 서울 양천구에 위치한 양화교까지 유역면적 287.1km², 총

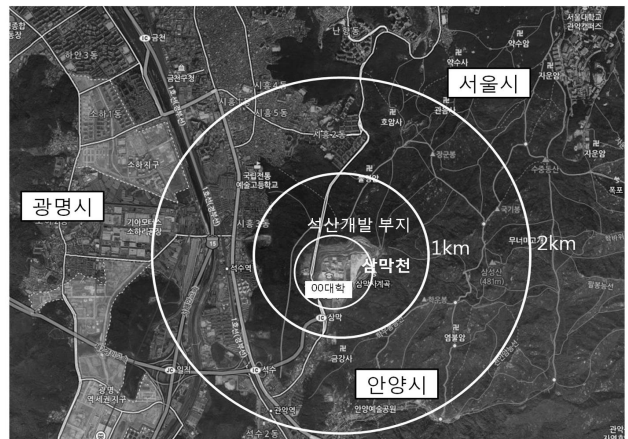


그림 1. 연구대상 현장 위치도

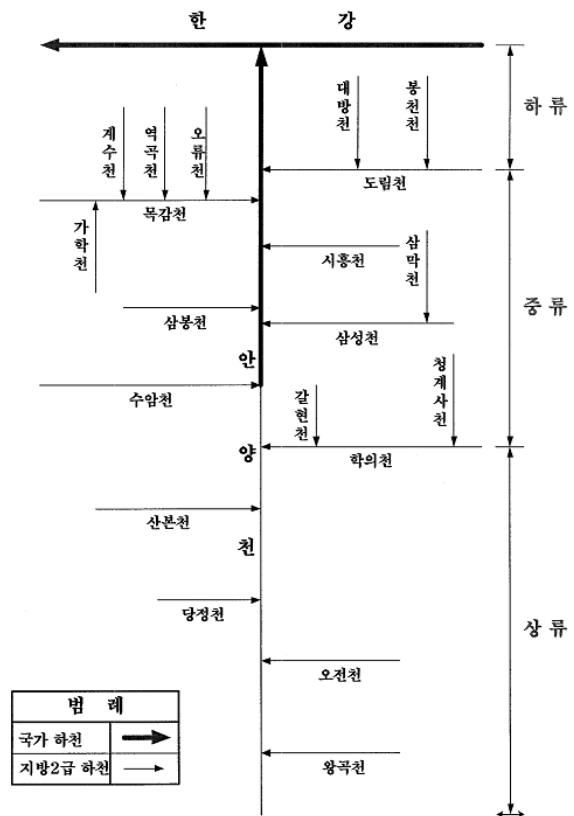


그림 2. 안양천 유역의 수계 모식도(과학기술부, 2007)

유로연장은 34.74km이다(이명복, 2002; 이양규 & 김갑진, 2000). 그림 2에서 보는 바와 같이 안양천은 왕곡천 외 19개 지류를 포함하고 있으며, 지리적으로는 남동측에 위치한 백운산(564.2m)을 기점으로 남쪽의 수원시 접경인 구능을 지나 남서측의 수리산(474.8m) 및 수암봉의 능선을 따르고 있다. 북동측은 박달천과 수암천이 흐르고 있으며, 북측은 관악산(629m)에 연결된 삼성산(479m)의 구능지로 삼막천과 삼성천이 각각 안양천에 연류되어 있다. 북동측은 청계산(618m), 남측의 국사봉과 바라산에서 발원하는 지류가 모인 백운저수지와 청계천이 모여 학의천을 이루고 있다(안양시, 2001; 이양규 & 김갑진, 2000; 이양규 & 조원철, 2006; 한중근 등, 2004).

삼막천은 안양천의 중류 측에 위치하고 있는 하천으로서 유역면적 5.39km, 유로연장 4.63km인 지방 2급 하천이다. 평균고도는 EL.184m로 비교적 높은 위치에 위치하고 있으며, 하도경사는 하류부가 1/120, 중상류부가 1/10~1/50정도의 급경사 하천이다. 이와 같이 급경사로 인하여 삼막천의 중금속오염은 하류로 연결되는 지류하천에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다(김창희, 2008).

2.2 지반조사 결과

그림 3에서 보는 바와 같이 본 연구대상 지역에 대하여 석산개발 후 매립된 지반을 파악하기 위하여 지반조사를 실시하였다. 지반조사 결과, 표 1에 보는 바와 같이 매립층은 지표로부터 최소 5.2m~최대 12.8m에 위치하는 것으로 나타났으며, 지하수위는 5.98m~9.30m로 측정되었다. 또한 석산개발 부지의 정리복구사업 시에 전석, 잔사 및 석분이 매립에 사용되었음을 알 수 있었다.

표 1. 지반조사 결과

구 분	지반고	매립층 깊이(m)	공내지하수위(m)
B.H 1	73.6	7.6	8.4
B.H 2	71.1	5.2	7.2
B.H 3	73.6	7.6	8.4
B.H 4	67.0	5.5	5.4
B.H 5	66.3	5.2	5.98
B.H 6	75.7	8.5	8.2
B.H 7	70.8	12.8	9.3
B.H 8	73.3	7.0	굴진심도이하

3. 중금속 오염도 조사

3.1 하천의 중금속 오염도

3.1.1 조사 지점 및 방법

삼막천 및 석산개발 부지의 오염상태를 조사하기 위하여 그림 4에 나타난 바와 같이 총 5개 지점을 선정하였다. 삼막천의 경우에는 삼막천 상류수, 연못수와 삼막천수의 합류수 및 삼막천 중류수를 채수하였으며, 대학부지 내에서는 연못수와 지하 관정에서 뽑아 올린 지하수를 채수하여 분석을 실시하였다. 각 수질시료 채취지점에서 총 3차례에 걸쳐 시료를 채수 하였으며, 1차 수질조사는 채수 전 일주일 이내에 강우의 유입이 없을 때 실시하였다. 그리고 2차 수질조사는 채수 전 3일 정도에 0.5mm의 강우가 발

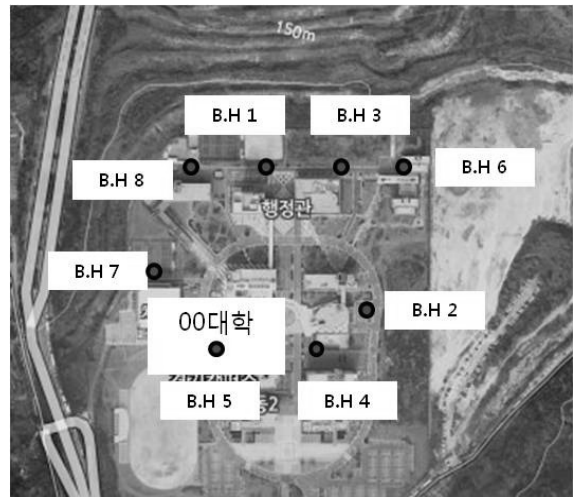


그림 3. 지반조사 위치도



그림 4. 수질시료 채취지점

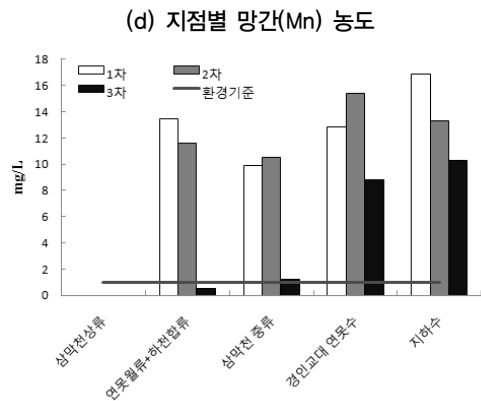
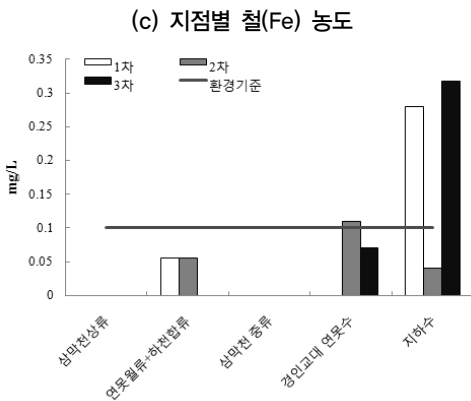
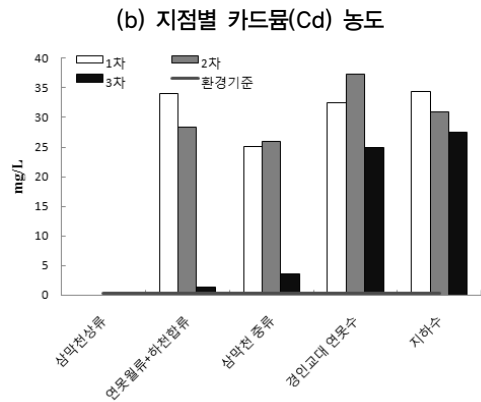
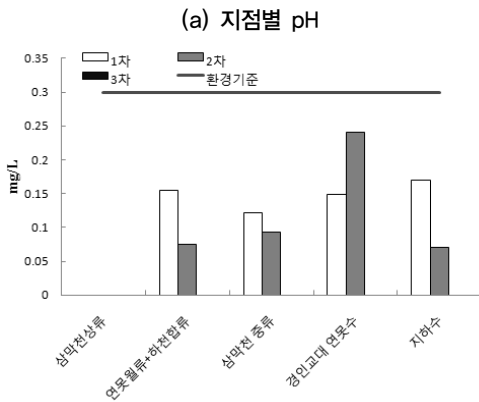
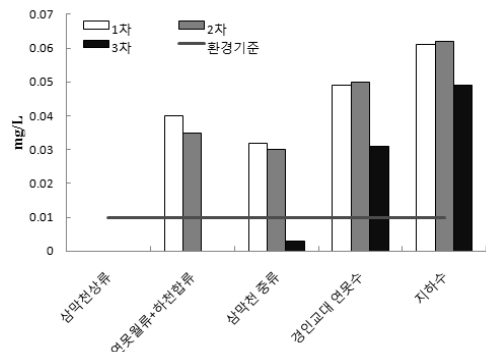
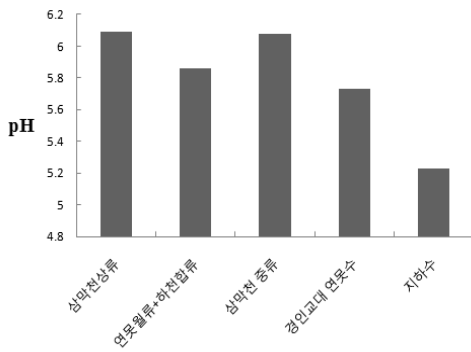
생한 후에 실시하였으며, 3차 수질조사는 29.0mm의 상당한 강우량이 발생하고 3일 정도 후에 실시하였다. 중금속 오염 분석은 비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 철, 망간, 아연 및 납의 경우에는 발광광도법에 의한 유도결합플라즈마 및 질량분석기로 수행하였다. 또한 수은은 환원기법에 의한 수은 분석기를 이용하여 측정하였으며, 중금속의 용해특성과 관련이 있는 pH농도는 pH-meter를 이용하여 2, 3차 채수 시에 측정하였다.

3.1.2 중금속 오염도 조사결과

중금속 항목에 대한 수질조사 결과, 삼막천 상류에서는

중금속이 검출되지 않았으며, 나머지 지점에서는 카드뮴, 철, 망간, 납 및 아연 등 다량의 중금속 농도를 나타내었다. 9종의 중금속 분석항목 중 크롬, 비소, 구리 및 수은은 검출되지 않았다.

먼저, 각 채취지점의 pH를 그림 5(a)에 나타내었다. 삼막천의 평균 pH는 6.01로 전체적으로 약산성의 특성을 나타내었으며, 지하수에서 가장 높은 산성을 갖는 것으로 확인되었다. 그리고 중금속오염 결과는 그림 5(b)~그림 5(f)에서 보는 바와 같다. 그림 5(b)의 채수지점별 카드뮴 농도는 삼막천 상류지점에서는 검출되지 않았으며, 나머지 지점에서는 환경기준을 초과하는 다량의 카드뮴 농도를 나



(e) 지점별 납(Pb) 농도

(f) 지점별 아연(Zn) 농도

그림 5. 삼막천의 중금속오염 농도

타내었다. 특히, 지하수의 채수시기별 카드뮴 농도는 1차 ~3차 채수 시에 각각 0.061mg/L, 0.062mg/L 및 0.049mg/L로 확인되어 오염이 가장 심한 것으로 분석되었다. 그림 5(c)에서 나타낸 철 농도는 삼막천 상류지점에서는 검출되지 않은 반면에, 나머지 지점에서는 다량의 철 농도가 확인되었다. 이 중 대학 연못수 오염이 가장 큰 것으로 분석되었지만, 환경기준에는 만족하는 것으로 확인되었으며, 연못수 지점의 2차 채수결과를 제외하고는 모든 지점에서 강우로 인하여 점진적으로 철의 농도가 감소하는 것으로 분석되었다. 망간 농도는 그림 5(d)에서 보는 바와 같이 삼막천 상류지점에서는 검출되지 않았으며, 나머지 지점에서 환경기준을 크게 초과하는 다량의 망간 농도가 확인되었다. 오염도가 가장 심한 지점으로는 대학 연못수와 지하수인 것으로 나타났는데, 이는 환경기준(0.3mg/L)

의 약 100배 정도를 초과하는 것으로서 오염상태가 매우 심각한 수준인 것으로 분석되었다. 그림 5(e)에서 보는 바와 같이 납의 경우에는 삼막천 상류지점과 삼막천 중류지점은 검출되지 않았지만, 지하수의 경우에는 1차 및 3차 채수 시에 오염농도가 가장 높은 것으로 분석되었다. 이때, 지점별 강우에 따른 납 농도는 검출되지 않거나 점진적으로 감소하는 경향으로 나타났지만, 지하수의 경우에는 2차 결과가 현저히 낮아지는 것으로 확인되었다. 이는 1차 및 3차 분석결과를 바탕으로 2차 분석결과가 실험오차에 의한 것으로 판단되었다. 마지막으로 그림 5(f)에 나타낸 아연의 농도는 삼막천 상류지점을 제외한 나머지 지점에서 환경기준을 초과하는 다량의 농도가 검출되었으며, 그 중 지하수와 대학 연못수의 오염이 가장 높은 것으로 분석되었다.

표 2는 수질오염에 대한 환경기준과 채취한 시료의 중금속 농도 분석결과를 나타낸 것으로, 검출된 중금속 중에 철을 제외한 나머지 중금속인 카드뮴, 망간, 납 및 아연은 기준치를 초과하고 있으며, 3차 채수시기에서 농도가 감소하는 경향은 강우에 의한 희석으로 인하여 야기된 것으로 판단된다.

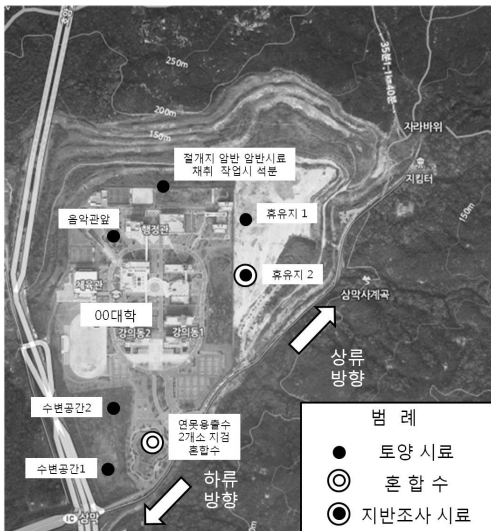


그림 6. 토양시료 및 혼합수 채취지점

3.2 토양의 중금속 오염도

3.2.1 조사 지점 및 방법

석산개발 부지의 토양오염도 조사를 위하여 그림 6과 표 3에서 보는 바와 같이 총 8개소의 토양시료, 절개지 암반시료 및 암반시료 채취 작업 시 석분을 채취하여 중금속류의 함유량 분석을 실시하였다. 5개소의 토양 및 암반시

표 2. 채수시료의 중금속오염 분석결과

구분	단위	환경 기준	삼막천 상류			연못수와 삼막천 합류지점			삼막천 중류			대학 연못수			지하수		
			1차	2차	3차	1차	2차	3차	1차	2차	3차	1차	2차	3차	1차	2차	3차
비소	mg/L	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
카드뮴	mg/L	0.01	-	-	-	0.040	0.035	-	0.032	0.030	0.003	0.049	0.049	0.031	0.061	0.062	0.049
크롬	mg/L	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
구리	mg/L	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
철	mg/L	0.3	-	-	-	0.155	0.075	-	0.121	0.093	-	0.148	0.239	0.110	0.170	0.071	
망간	mg/L	0.3	-	-	-	34.10	28.32	1,380	25.01	25.94	3,538	32.48	37.37	24.88	34.41	30.98	27.49
납	mg/L	0.1	-	-	-	0.055	0.056	-	-	-	-	-	0.112	0.071	0.280	0.040	0.317
아연	mg/L	1.0	-	-	-	13.49	11.60	0.518	9.90	10.48	1,256	12.81	15.40	8,828	16.84	13.34	10.28
수은	mg/L	검출 불허	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

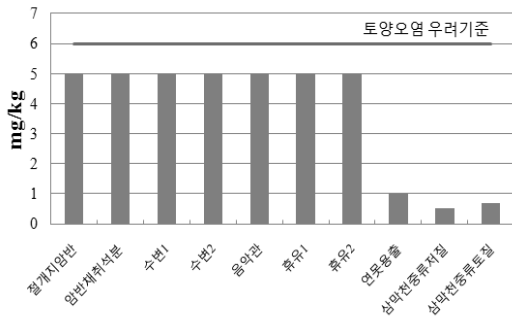
표 3. 시료 채취지점별 분석항목

위 치	분석 항목	시료 특성	굴착깊이
절개지 암반	중금속	3~5m 채취시료혼합	5m
절개지 암반 채취시 석분	중금속	암반 채취시 석분	
수변공간 1	중금속	3~5m 채취시료혼합	5m
수변공간 2	중금속	3~5m 채취시료혼합	5m
음악관 앞	중금속	5~8m 채취시료혼합	9m
휴유지 1	중금속	6~9m 채취시료혼합	9m
휴유지 2	중금속	보링작업후 침전시료	
연못용출수 2곳 혼합수	중금속	용출수 2곳 채수시료	

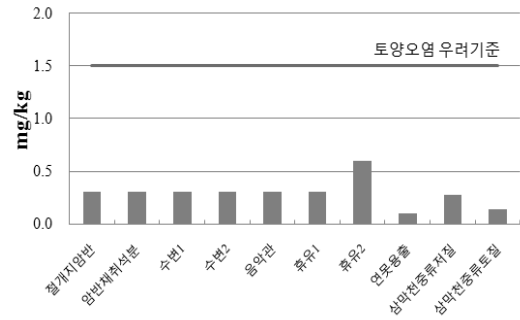
료는 크롤러드릴을 이용하여 채취하였으며, 절개지 암반 채취 시 발생된 석분, 연못용출수 2곳의 혼합수 및 삼막천 종류의 저질과 토양을 채취하였다. 또한 삼막천 종류의 저질 및 토양에 대한 추가적인 오염조사를 수행하여 석산개발부지 토양조사 결과와 비교하였다.

3.2.2 중금속 오염도 조사결과

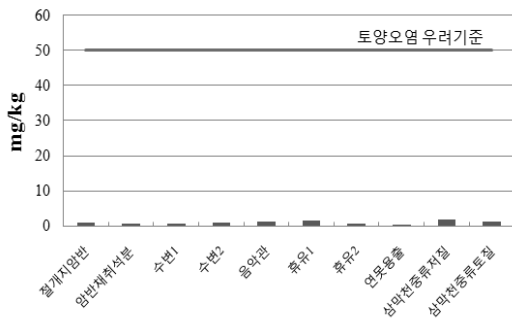
절개지 암반의 시료는 석산 절개지를 직접 굴착하여 채취한 것으로서, 암반의 성분과 매립지내의 채취시료와의 차이점을 파악할 수 있는 준거시료로서의 중요한 의미를 가지고 있다. 따라서 절개지 암반시료의 중금속 함유량을 분석한 결과, 철(214.7mg/kg) > 망간(21.9mg/kg) > 아연(15.80mg/kg) > 납(8.7mg/kg) > 비소(5.0mg/kg) > 구리(0.8mg/kg) > 카드뮴(0.30mg/kg)의 순으로 확인되었다.



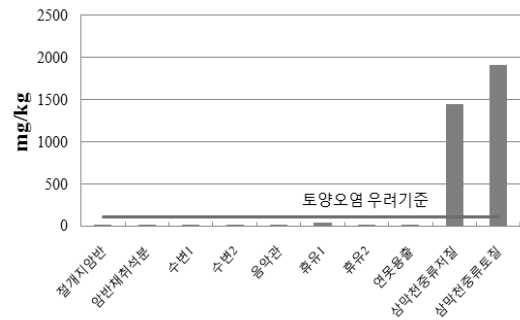
(a) 비소(As) 농도



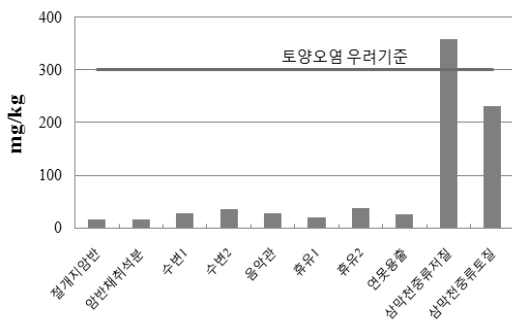
(b) 카드뮴(Cd) 농도



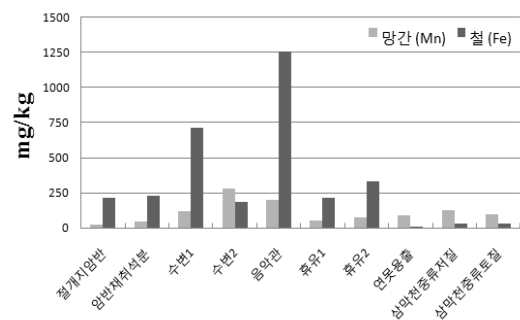
(c) 구리(Cu) 농도



(d) 납(Pb) 농도



(e) 아연(Zn) 농도



(f) 철(Fe) 농도

그림 7. 지점별 토양오염 조사 결과

표 4. 토양의 중금속오염 분석결과

검사 항목	단위	토양오염우 려기준	절개지 암반	절개지 암반채취시 성분	수변 공간1	수변 공간2	음악 관앞	휴유지 1	휴유지 2	연못 용출수	삼막천 중류 저질	삼막천 중류 토질
비소 (As)	mg/kg	6	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	1.0	0,524	0,675
카드뮴 (Cd)	mg/kg	1,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,1	0,274	0,137
구리 (Cu)	mg/kg	50	0,8	0,5	0,6	0,9	1,2	1,6	0,7	0,1	1,866	1,116
납 (Pb)	mg/kg	100	8,7	7,2	3,8	2,6	7,9	35,6	9,2	0,5	1450	1912
아연 (Zn)	mg/kg	300	15,8	15,1	27,7	35,4	28,0	20,7	37,4	26,4	358	232
철 (Fe)	mg/kg	-	214,7	231,7	709,6	180,7	1258,0	216,8	330,6	1,6	31,07	29,1
망간 (Mn)	mg/kg	-	21,9	41,1	117,0	282,5	196,7	50,6	72,8	85,6	122,2	98,92

암반의 시료를 제외한 나머지 지점별 분석결과도 절개지 암반시료와의 함유량차이는 다소 있으나 구성비율은 유사한 것으로 조사되었다.

그림 7과 표 4에서 보는 바와 같이 토양의 비소 농도는 최대 5.0mg/kg으로 토양오염 우려기준 이하의 농도를 나타냈으며, 카드뮴, 구리, 납 및 아연의 농도도 각각 0.1mg/kg~0.6mg/kg, 0.1mg/kg~1.6mg/kg, 0.5mg/kg~35.6mg/kg 및 15.1mg/kg~37.4mg/kg의 기준이하 농도를 나타내었다. 그러나 철의 농도는 180.7mg/kg~1258.0mg/kg, 망간의 농도는 21.9~282.5mg/kg로 확인되었으며, 특히 음악관 앞의 철의 농도는 절개지 암반의 농도와 비교해도 상당히 높은 수준인 것으로 나타났다.

한편, 삼막천의 저질 및 토양의 중금속 함유량을 조사한 결과, 비소와 카드뮴을 제외한 나머지 항목들의 함유량이 매우 높은 것으로 조사되었다.

4. 중금속 오염도 평가 및 대책방안

4.1 하천 및 토양의 중금속 오염도 평가결과

총 5개 지점에서 채수한 시료에 대하여 9개의 중금속 항목에 대한 오염도 평가결과, 삼막천 상류에서는 중금속이 검출되지 않은 반면에, 나머지 지점에서는 크롬, 비소, 구리 및 수은을 제외한 중금속 항목에서 다량의 농도가 확인되었다. 특히, 연못과 하천의 합류구간 및 삼막천 중류에서는 1차, 2차 및 3차 채수시료가 비슷한 경향의 중금속 농도를 나타내었으며, 3차 시료의 경우에는 매우 낮은 농도가 확인되었다. 이는 3차 시료의 채수가 높은 강우량을 기록한 후에 이루어진 점을 고려할 때, 강우로 인하여 증

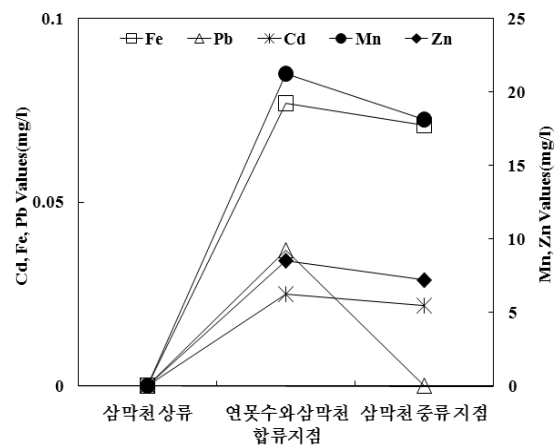


그림 8. 삼막천 지점별 중금속 농도

가된 하천수에 의해 희석효과가 반영된 것으로 평가되었다. 한편, 지하수는 카드뮴과 납을 제외한 중금속에 있어서 농도가 점진적으로 감소되는 것으로 나타났으며, 이는 강우가 지하에 침투하는 시간만큼 지연되었기 때문이다. 또한 연못수의 중금속 농도의 경우, 2차 시료가 1차 시료보다 농도가 증가된 원인은 소량의 강우에 의해 지하로 유입된 침투수로 인하여 매립층의 지하수가 연못으로 용출되기 때문이며, 3차 시료에서 중금속 농도가 감소한 것은 높은 강우량으로 인한 희석이 원인으로 평가되었다.

그림 8은 삼막천 지점별 평균 중금속 농도를 나타낸 것으로서, 앞서 언급한 바와 같이 상류에서는 중금속이 검출되지 않았다. 그러나 연못수와 삼막천 합류지점에서 중금속 농도가 크게 증가하였으며, 중류지점에서는 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같이 연못수와 삼막천 합류지점에서의 중금속 농도의 증가가 큰 원인으로서는 석산개발로 인하여 발생된 미세석분 및 침출수가 삼막천으로 유입되면서 오염을 초래한 것으로 판단된다. 특히 대학 부지

내의 연못수 오염은 정리복구 당시에 석산개발로 인하여 발생된 잔사 및 석분 등이 매립(두께 약 5.2~12.8m)에 사용되어 나타난 결과로 판단된다. 즉, 강우에 의한 우수가 매립층으로 침투하여 석분 등에 함유된 중금속을 용해시켜 오염이 발생되었으며, 지하로 침투한 우수가 연못으로 용출되어 오염을 가중시킨 것으로 평가되었다. 그리고 중금속에 오염된 연못수가 삼막천으로 합류되면서 삼막천의 중금속오염이 진행되었으며, 삼막천과 연못수의 수소이온 농도의 차이로 인한 수산화 침전물에 의해 삼막천 저질 및 토양의 중금속오염을 초래한 것으로 판단된다.

중금속오염 정도를 종합적으로 판단하기 위하여 식 (1)과 같이 토양의 복합된 오염양상을 파악할 수 있는 오염지수(Pollution Index, PI)를 통해 오염정도를 평가하였다(김순오 등, 2006; Nishida et al., 1982). 오염지수는 중금속 원소들의 복합적인 오염특성을 나타내기 때문에 본 연구에서 조사대상인 중금속들을 모두 고려하여 오염지수를 산정하였다. 이 때, 오염지수가 1.0 이상이면 평균적으로 고려 대상인 중금속들의 함량이 허용기준치 이상인 것으로 간주하여 인위적 또는 자연적 요인에 의한 오염이 이루어진 것으로 판단한다.

$$PI = \frac{\sum(\text{금속의 총 농도} / \text{해당중금속의 허용한계치})}{\text{중금속의 개수}} \quad (1)$$

먼저, 하천의 중금속 오염도는 중금속이 검출되지 않은 삼막천의 상류를 제외한 나머지 채수지점에서의 오염지수를 통해 평가하였으며, 환경기준을 허용한계치로 적용한 오염지수 평가결과는 표 5에 나타낸 바와 같다. 강우에 의해 희석된 농도가 나타난 3차 시료를 제외하고, 1차 및 2차 시료에 대한 오염지수를 평가한 결과, 19.37~29.4의

매우 높은 오염지수가 확인되었다. 또한 삼막천 종류의 경우, 납이 검출되지 않았음에도 불구하고 높은 오염지수가 나타났으며, 연못수와 지하수의 오염은 매우 심각한 것으로 확인되었다. 이는 석산개발로 인하여 오염된 지하수와 연못수가 삼막천 오염의 주원인인 것을 의미한다.

토양의 중금속 오염지수 평가는 토양환경보전법에서 제시하고 있는 토양오염 우려기준에 의한 중금속의 허용한계치를 이용하였다. 또한 석산개발에 의한 토양오염 평가를 위해서 절개지 암반채취 시 석분 시료를 기준으로 주변 토양의 오염지수를 평가해보았다. 토양의 중금속 오염 조사를 위하여 선정된 각 시료채취 지점별 오염지수 산정 결과를 표 6에 나타내었다. 오염지수를 이용한 오염도 평가결과, 토양의 중금속오염은 허용기준치 이하인 것으로 확인되었지만, 절개지의 석분시료를 이용한 석산개발 부지 주변의 토양오염지수는 대부분의 지점에서 1.0을 초과하여 중금속오염이 이루어진 것으로 평가되었다. 이는 석산개발에 의해 발생한 중금속이 주변 토양의 중금속오염에 크게 기여한 것을 의미한다. 특히 삼막천 종류 저질 및 토양의 중금속 오염지수가 각각 2.68 및 3.43으로 타 지점에 비해 높게 나타났는데, 이는 지하수의 침투와 연못수의 삼막천 유입에 의해서 절개지의 중금속이 삼막천 하상에 퇴적되어 중금속 오염이 높게 이루어진 것으로 판단된다.

오염지수를 이용한 중금속 오염도를 평가한 결과, 하천의 경우에는 석산개발에 의해 발생한 석분 및 침출수가 1차적으로 주변의 토양오염을 야기했으며, 이로 인하여 지하수 및 연못수에 2차적인 중금속오염인 이루어진 것으로 평가되었다. 그리고 토양의 경우에는 삼막천 종류의 저질 및 토양에서 가장 높은 중금속 오염도가 나타났으며, 이는 석산개발에 의한 석분 및 침출수로 인하여 오염된 연못수와 지하수의 영향을 받은 것으로 분석되었다.

표 5. 석산개발 주변수계의 중금속 오염지수

시료 구분	연못 월류+하천 합류수	삼막천 종류수	학교내 연못수	지하수
1차	26.4	19.37	25.29	28.20
2차	22.06	20.05	29.39	24.69

표 6. 토양의 중금속 오염 지수.

구 분	절개지 암반	절개지 암반 채취시석분	수변 공간1	수변 공간2	음악관 앞	휴유지 1	휴유지 2	연못 용출수	삼막천 중류저질	삼막천 중류토질
토양오염 우려기준 농도 기준으로 산출한 오염지수	0.24	0.23	0.24	0.24	0.25	0.29	0.3	0.07	0.21	0.17
절개지암반 채취시료의 중금속 오염농도를 기준으로 산출한 오염지수	-	-	1.11	1.30	1.47	1.63	2.30	0.51	3.43	2.68

평가결과를 바탕으로 삼막천의 저질, 토양 및 절개지 암반의 중금속 함유량을 비교한 결과를 그림 9에 나타내었다. 삼막천의 저질 및 토양의 중금속 함유량은 비소와 카드뮴을 제외한 나머지 항목들에서 암반의 중금속 함유량보다 높은 농도를 나타내고 있다. 이는 표면적이 증가된 미세한 석분이 침투수와 함께 삼막천에 유입·침전되어 나타난 결과로 분석되었다. 또한 삼막천에서는 유해 중금속 물질 중 하나인 카드뮴이 하천뿐만 아니라 저질 및 토양에서 다량으로 검출되었다. 즉, 삼막천에서 저질 및 토양의 카드뮴 등의 농도가 증가된 원인은 pH가 낮고 중금속 농도가 높은 석산 용출수가 삼막천의 심한 경사를 통해 하류로 이동하면서 하수 및 우수와 혼합되었으며, 이는 pH 증가 및 중금속 용해도의 감소로 인한 침전이 발생하였기 때문이다. 따라서 삼막천의 중금속오염에 대한 제어 및 대책방안이 필요하다 할 수 있다.

4.2 삼막천의 중금속 제어방안

삼막천의 저질, 토양 및 수질오염의 원인은 석산개발에 따른 미세석분 및 침투수로 기인한 것으로 확인되었다. 그러나 석산개발이 종료된 후 정리복구 사업 시에 석산개발의 부산물인 석분 및 잔사를 매립한 후 현재 교육시설이 시공되었기 때문에 오염의 원인인 매립 석분 및 잔사를 처리하는 것은 불가능할 것으로 판단된다. 그리고 침투수의 경우에는 부지를 통과하는 지하수가 수변공간의 연못으로 용출되고 있으며, 연못수는 삼막천으로 합류되기 때문에 지하수의 수질개선에 의해 삼막천의 수질이 개선될 수 있을 것으로 분석되었다. 따라서 오염된 지하수의 처리방안은 다음과 같이 제시할 수 있다.

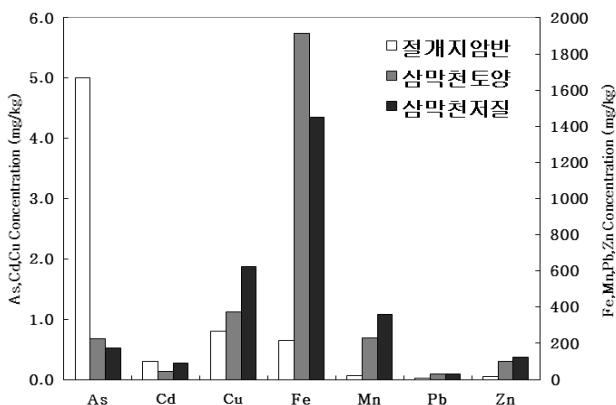


그림 9. 삼막천 저질 및 토양의 중금속 농도와 절개지 암반의 중금속 농도

먼저, 오염된 지하수를 포집하여 외부처리시설로 이송·처리한 후 삼막천에 방류하게 되면 삼막천의 중금속 오염을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이에 중금속 폐수처리는 연못수의 낮은 pH(=5.73)특성을 감안하여 중화침전법에 의한 처리가 가능할 것으로 예상된다. 즉, 용해상태의 중금속이온의 농도와 pH와의 관계는 pH가 증가할수록 금속의 용해도가 급격히 감소하기 때문에, 수산화나트륨 및 소석회를 이용하여 침전물을 형성시켜 처리할 수 있다. 그리고 삼막천 중류지점의 경우에는 저질 및 토양의 중금속 농도가 높은 것으로 분석되었기 때문에 하상 퇴적물 준설이 필요하며, 퇴적물 준설은 앞서 언급한 2차 오염의 방지를 위해 삼막천의 중금속 제어 후 시행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 앞서 언급한 처리방안과 함께 오염도가 심각하거나 복합적으로 오염된 폐광지역에서 활용할 수 있는 투수성 반응벽체(PRB, Permeable Reaction Barrier) 시스템을 이용하면 중금속 처리가 용이할 것으로 판단된다. 특히, 본 현장과 같이 장기적으로 중금속이 용출되는 경우에는 화학적 침전에 의한 단기적인 처리방법에 의존하기 보다는 오염물의 이동경로에 PRB시스템을 복합적으로 설치하여 운영하는 것이 보다 바람직할 것으로 판단된다. 이와 관련하여 PRB 시스템 구성에 필요한 충전물질은 친환경성, 경제성 및 효율성을 적절히 고려한 선택이 필요하며, 특히 최근에는 재강슬래그, 톱밥, 폐영가철, 음식폐기물 등을 재활용한 연구가 활발히 이루어지고 있다(이종영, 2010). 따라서 삼막천으로 유입되는 중금속으로 오염된 지하수의 정화를 위해서는 경제성, 시공성을 고려하여 중화침전법 및 PRB 시스템을 복합적용하거나 선택적인 적용이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 안양 00지구 석산개발 부지 현장을 사례로 석산개발에 따른 인접수계 및 토양의 중금속 오염도를 분석하여 대책방안을 제시하였으며, 이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 석산개발 부지 인근에 위치한 삼막천의 중금속오염 조사 및 분석결과, 연못수와 삼막천 합류지점에서 중금속 농도가 크게 증가하였으며, 중류지점에서는 감소하였다. 이는 석산개발로 인하여 발생된 미세석분 및 침출수가 삼막천으로 유입되면서 오염을

초래한 것으로 판단되었다. 특히 연못수 오염은 정리복구 당시에 석산개발로 인하여 발생된 잔사 및 석분 등이 매립에 사용되어, 강우에 의한 우수가 매립층으로 침투하여 석분 등에 함유된 중금속을 용해시켜 오염이 발생된 것으로 평가되었다.

- (2) 석산개발 주변지역의 중금속 오염도에 대하여 오염지수를 이용하여 평가한 결과, 석산개발로 인하여 오염된 지하수와 연못수가 삼막천 오염의 주원인인 것으로 분석되었다. 또한 토양의 중금속오염은 삼막천 중류의 저질 및 토양의 중금속 오염지수가 상대적으로 높게 나타났으며, 이는 지하수의 침투와 연못수의 삼막천 유입에 의하여 절개지의 중금속이 삼막천 하상에 퇴적된 것으로 분석되었다.
- (3) 중금속 오염도 평가결과를 분석한 결과, 하천의 경우에는 석산개발에 의해 발생한 석분 및 침출수가 주변 토양으로부터 지하수 및 연못수에 이르기까지 중금속오염을 야기한 것으로 평가되었다. 따라서 삼막천 오염의 주원인인 지하수에 대한 중금속 제어는 경제성, 시공성을 고려하여 중화침전법 및 PRB 시스템을 복합적용하거나 선택적인 적용이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 삼막천 중류지점의 경우에는 하상 퇴적물 준설이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 과학기술부 (2007), *안양천유역현황보고서 : 안양천유역의 물순환 건전화 기술적용*.
2. 김순오, 정영일, 조현구 (2006), “삼산제일·삼봉 동광산 주변 수계의 중금속 오염도 평가”, *한국광물학회지*, 제19권, 제3호, pp.171-187.
3. 김종우 (2001), “석산개발에 따른 소음의 영향 및 저감방안”, *산업기술연구*, 제19권, 제1호, pp.69-77.
4. 김창희 (2008), *도시하천수질에 영향을 미치는 유역 특성*, 박사학위 논문, 서울시립대학교.
5. 마호섭 (2004), “석산개발지역의 천공녹화공법 연구”, *경상대학교 농업생명과학연구*, 제38권, 제4호, pp.85-91.
6. 안양시 (2001), *안양천 살리기*.
7. 이명복 (2002), *안양천유역의 효율적인 관리방안에 관한 연구*, 석사학위 논문, 안양대학교.
8. 이양규, 김갑진 (2000), “안양천의 생태학적 수질오염 실태 분석”, *대한토목학회논문집*, 제22권, 제3-B호, pp.447-459.
9. 이양규, 조원철 (2006), “안양천에서의 생태학적 수질오염도 평가”, *한국환경복원녹화기술학회지*, 제9권, 제3호, pp.39-50.
10. 이종영 (2010), *중금속으로 오염된 지반에서 음식폐기물 탄화제를 적용한 PRB 정화기법*, 박사학위 논문, 중앙대학교.
11. 한중근, 이양규, 남정만 (2004), “안양천의 계절별 수질분석”, *한국환경복원녹화기술학회지*, 제7권, 제4호, pp.52-60.
12. Nishida H., Miyai, M., Tada, F. and Suzuki, S (1982), “Computation of the index of pollution caused by heavy metals in river sediments”, *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*, Vol.4, No.4, pp.241-248.

(논문접수일 2010. 11. 23, 심사완료일 2010. 12. 23)