

가행광산 지역의 비점오염물질 유출특성

서지연·신민환*·원철희·최용훈·정명숙**·임경재·최중대†

강원대학교 지역건설공학과
*국립환경과학원 금강물환경연구소
**국립환경과학원 한강물환경연구소

Characteristics of NPS Pollution from a Coal Mining

Jiyeon Seo · Minhwan Shin* · Chul-hee Won · Yong-hun Choi · Myung-suk Jung** ·
Kyoung Jae Lim · Joongdae Choi†

Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University
*Geum River Environment Research Center
**Han River Environment Research Center

(Received 7 December 2009, Revised 26 January 2010, Accepted 22 March 2010)

Abstract

This study was conducted to describe the characteristics of Non-point source (NPS) Pollution discharge from a coal mining area in Korea. The study areas is located on the Dogye site, Samchuk, Kangwon Province Coal Corporation and the Jangsung site, Taebaek, Kangwon Province Coal Corporation. The monitoring system was installed at a drainage channel and water samples and rainfall events were collected during March 2008 to February 2009. The collected water samples were analyzed with respect to SS, BOD, COD_{Cr}, COD_{Mn}, T-N, T-P, and TOC, respectively. It was observed that the runoff and water quality were largely influenced by mine drainage. Also a significant relationship was observed from the correlation between flow and water quality, flow and NPS. And estimated Event Mean Concentration (EMC), NPS pollution loads were Dogey coal mine and Taebaek coal mine respectively. As the study progresses in the future, runoff and pollution loads will be updated.

keywords : Coal mining, Event Mean Concentration (EMC), Non-point source (NPS), Pollutant load, Runoff

1. 서론

비점오염원은 지역의 토질, 주거형태, 강우형태 등 다양한 인자들에 의해 영향을 받는다. 이러한 비점오염원을 정확하게 파악하기 위해서는 토지이용형태에 따라 관측 자료의 수집과 분석이 필요하다(신민환 등, 2007). 또한 토지이용별 관측 자료를 축적하고 강우유출특성과 비점오염부하 그리고 EMC 등을 산정하여 비점오염원에 대한 정량적인 분석과 효율적인 관리방안이 마련되어야 한다.

미국에서는 이미 1970년대부터 비점오염원의 중요성을 인식하고 지속적인 연구를 수행하여 많은 자료를 축적해 오고 있다(U.S. EPA, 1983). 우리나라는 1980년대 초반부터 비점오염원 원단위를 산정하기 위한 연구를 시작하였으며(신은성 등, 2001), 지난 2004년부터는 국립환경과학원 산하 4대강 물환경연구소에서 오염총량관리 단위유역 말단부에서 전기·우기의 구별 없이 8일 간격으로 유량과 수질을 모니터링하여 이들의 변동여부를 확인하고 있다(김상단 등, 2007). 이러한 모니터링 자료로부터 산정된 비점오염원

단위는 환경부에서 추진하고 있는 수질오염총량관리계획을 수립하고 시행하는데 이용될 수 있다. 이에 환경부는 기존의 비점오염원 원단위 부하를 세분화하여 오염총량제도의 오염부하 산정의 정확도를 향상시키려고 노력하고 있으며, 토지피복분류별 원단위를 산정하기 위한 장기 연구를 지원하고 있다. 정부의 토지피복분류는 전국의 토지를 대분류, 중분류 그리고 소분류 등 총 47개로 구분하고 있으며, 이 중 습지와 수체를 제외한 45개 토지피복분류별 원단위를 산정하여 기존의 비점오염부하 원단위를 대체할 예정이다(환경부, 2003).

한편 우리나라의 비점오염원에 관한 연구는 주로 도시지역과 농촌의 논을 포함한 농경 유역을 중심으로 수행되어 왔다(신용철 등, 2006; 이치타오 등, 2008; 주진호 등, 2007; 최중대, 1999). 그러나 수질오염총량관리계획의 시행에 필요한 세부지목 중 가행 광산의 비점오염부하에 대한 연구는 실시하지 않고 있으며(광해방지사업단, 2009), 주로 폐광된 갱구로부터 발생하는 산성광산배수(Acid mine drainage, AMD)의 수질 조사에 관한 연구(오재일 등, 2005; 조영도 등, 2007)와 석탄광산배수에 함유된 중금속제거에 관한 연구(이현준, 2006; 조영도 등, 2007), 그리고 폐탄광 광산배수의 정화시설에 관한 연구(임길재, 2002)가 진행되었다.

* To whom correspondence should be addressed.
jdchoi@kangwon.ac.kr

따라서 본 연구의 목적은 정부의 토지피복분류의 세분류에 속하는 가행광산 지점을 대상으로 강우시 유량과 수질을 모니터링하여 Event Mean Concentration(EMC)와 오염부하를 산정함으로써 수질오염총량제의 원활한 추진과 모델적용에 필요한 수질항목을 분석하였다. 본 연구를 통하여 수질오염총량관리계획의 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 모니터링 대상지점

우리나라의 석탄 가행 광산은 2008년 기준 7개소가 있으나, 태안광업소의 경우 부존량 고갈과 경영악화 등의 이유로 2008년 하반기에 폐광하였기 때문에 6개소만이 운영되고 있다(광해방지사업단, 2009). 모니터링 지점은 강우유출수량의 측정과 시료의 채취가 용이한 지형적 조건 혹은 배수로와 같은 시설이 존재하는 광산을 우선적으로 고려하여 선정하였다. 6개의 가행 광산을 사전 조사하여 선정된 지점은 강원도 삼척시 도계읍에 위치한 채탄작업을 위한 갱구 입구의 작업지역(Dogey coal mine, DCM)과 태백시 장성동에 위치한 석탄광산 저탄소(Taebak coal mine, TCM)이다.

DCM 갱구 주변은 가파른 경사면의 산림으로서 정상부에는 채탄작업시 발생한 광미와 광재를 보관하는 광재댐이 위치하고 있다. 산 밑에는 배수로가 있으며, 강우시 배출되는 강우유출수 외에 작업장의 청소용수, 석탄운반차량 세륜시설의 오수, 산림유출수, 석탄갱에서 용출되는 갱내수, 채굴장비에 사용되는 냉각수 등이 함께 배수로로 유입되고 있다. 즉 비강우시에도 상시 흐름이 있는 것이 큰 특징이다. TCM 지점은 비축탄이 두꺼운 비닐커버로 덮여있고, 배수로가 콘크리트 수로로 잘 정비되어 있으며, 배수로 중간에는 짧은 입자의 유사를 제거하기 위한 침사지가 설치되어 강우시 유출되는 유사가 일부 제거될 수 있다. 또한 TCM 지점은 DCM 지점과 달리 강우시에만 유출이 발생하기 때문에 저탄소의 유출특성을 비교적 정확하게 파악할

Table 1. Location and Area of Study Watersheds

Watershed	N	E	Area (km ²)
DCM	37° 13' 30"	129° 02' 38"	0.15
TCM	37° 06' 48"	129° 02' 05"	0.13

수 있는 장점이 있다. Fig. 1은 연구지역의 유역형상과 모니터링지점을 나타내었고, Table 1에는 모니터링 지역의 배수구역 면적과 모니터링 지점 좌표를 나타내었다.

2.2. 모니터링 장비 및 분석방법

DCM 지점은 부자식 자동수위계(Thalimedes, OTT, 독일)를 이용하여 5분 간격으로 수위를 측정하였고, 실측을 통하여 보정작업을 한 뒤 수위-유량곡선을 작성하여 강우시 수위별 유량을 산정하였다. 모니터링 지점의 정확한 수문분석을 위하여 모니터링 지점과 200 m 떨어진 곳에 자기강우량계(Aerodynamic rain gauge, Waterra, 영국)를 설치하여 강우량을 측정하였고, 태백기상대의 일강우량 자료를 이용하여 측정오차를 분석하였다. 자기우량계는 0.2 mm 단위로 강우량을 저장할 수 있도록 셋팅하였다. 수질분석을 위하여 자동채수기(ISCO 3700 automatic water sampler, Teledyne Isco, 미국)를 설치하였으며, 유출특성에 따라 30분에서 2시간 간격으로 채취하여 분석하였다. TCM 지점은 전자식 유량계(Flo-Tote 3)를 이용하여 15분 간격으로 유량을 측정하고 실측을 통해 보정하였으며, 강우량계와 자동채수기는 DCM 지역과 동일한 기기를 사용하여 분석하였다.

수질항목의 분석은 SS, BOD, COD_{Cr}, COD_{Mn}, T-N, T-P 6개의 항목을 수질오염공정시험법(환경부, 2005)에 준하여 분석하였으며, TOC는 total organic carbon analyzer(TOC-5000A, SHIMADZU, Japan)를 이용하여 분석하였다.

2.3. 유출계수와 EMC 및 연오염부하산정

비점오염원은 유출오염으로 강우에 의해 발생하는 유출량은 토지이용, 경사도, 강우강도 등에 따라 큰 차이가 발생한다(원철희 등, 2009). 유역특성에 따라 유출계수가 달라지므로 유역의 유출계수와 시간대별로 변하는 농도를 측정하여야 한다. 강우사상 유출율, R_x는 강우량 및 강우유출수 유량측정자료로부터 다음의 식 (1)으로 산정하였다(국립환경과학원, 2009).

$$R_x = \frac{\text{총유출량}}{\text{총강우량}} = \frac{\sum_{i=0}^{T_Q} (Q_i \times t_i) / (\sum_{j=0}^{T_Q} t_j) / A}{\sum_{j=0}^{T_P} P_j / 1000} \quad (1)$$

여기서, Q_i는 관측시간 i에서의 유출 유량(m³/sec), t_i는 관측시간 i-1에서 i까지의 시간(sec), A는 집수구역면적(m²), P_j는 관측시간 j-1에서 j까지의 강우량(mm), T_Q 및 T_P는 각각 총 유출지속시간 및 총강우지속시간이다.

유량가중평균농도(EMC)는 식 (2)에 의해서 계산하였다.

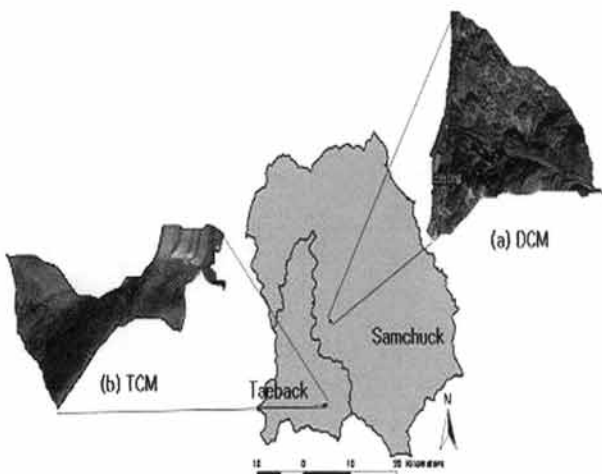


Fig. 1. Location and drainage area of DCM and TCM.

$$EMC = (\sum Q_i \cdot C_i) / \sum Q_i \quad (2)$$

여기서, Q_i 는 각 강우사상에서 i 번째 관측된 유출량(m^3/hr), C_i 는 각 강우사상에서 i 번째 관측된 오염물질 농도(mg/L)이다.

강우사상별로 산정된 유량가중평균농도는 강우로 인해 발생하는 유출수의 수질을 직접 평가할 수 있다는 측면에서 매우 유용하게 사용되고 있다(정동환 등, 2007). 또한 연간오염부하는 강우량비를 이용하여 측정하였다. 조사 기간 동안 측정된 강우사상별 강우량을 모두 더하여 강우사상의 총 강우량을 구한 뒤 연평균 강우량과의 비를 구하였다. 여기에 조사된 강우사상별 오염부하의 합계를 곱하여 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유출 및 강우 특성

2008년 3월부터 2009년 2월까지 12개월 동안 총 9회의 강우사상에 대하여 모니터링을 수행하였다. 모니터링 지점에 발생한 강우사상별 강우특성은 Table 2와 같다. 8월 이후의 강우사상에 대해서는 적은 강우와 기상청의 오보로 인한 강우로 샘플링을 수행할 수 없었다. DCM 지점의 선행건기일수(Antecedent Dry Day, ADD)는 0.25~9.25일, 강우량은 5.6~167.4 mm의 범위로 나타났다. 강우강도는 0.7~3.9 mm/hr의 범위를 보였으며, 유출은 6~54 시간 동안 지속되었다. 환경부(2005)에서 제시하는 토지이용별 유출계수의 표준값은 도로가 0.70~0.95, 기타 불투수면은 0.75~0.85, 경사가 완만한 산지는 0.20~0.40, 경사가 급한 산지는 0.40~0.60으로 나타내고 있다. 일반적으로 유출계수는 강우

강도, 선행건기일수, 강우지속시간 및 유역면적에 크게 영향을 받으며(김이형과 강주현, 2004), 강우강도는 재현기간별, 지역별 강우지속기간별로 다르게 나타난다(강신권과 김태균, 2008). DCM 지점의 유출계수는 0.54~2.34의 범위로 매우 크며, 다양한 범위로 조사되었다. 이는 유역특성상 강우유출수 외에 유입되는 갭내수와 산림 유출수 그리고 청소용수 등의 영향으로 강우량보다 유출량이 크게 산정된 것으로 판단하여 본 연구에서는 유출계수가 큰 의미를 가지고 있지 않다고 생각하여 생략하였으며, 비점오염부하는 가행광산 지역에서 발생하는 유입인자들의 영향을 포함하여 산정하였다. TCM 지점의 선행건기일수는 0.7~9.2일, 강우강도는 0.9~9.6 mm/hr, 강우는 7~34 시간동안 지속되었으며, 유출계수는 0.17~0.40의 범위를 보였다. 본 연구지점 TCM의 유출계수는 강우량, 강우강도, 강우지속시간 등의 인자와 큰 관련성을 찾을 수 없었다. 이는 TCM 지점이 포장지역인 도시지역과는 달리 투수지역과 불투수지역이 복합적으로 구성되어있기 때문에 대표적인 한 인자보다는 여러 인자가 강우 유출수량에 영향을 미친 것으로 판단된다.

3.2. 오염물질 유출특성 및 EMC 비교

Fig. 2에는 강우 모니터링에 의한 오염물질의 유출특성을 나타내었다. DCM 지점의 2009년 6월 28일~29일의 6번째 강우사상의 경우 T-N과 T-P, 그리고 SS를 제외한 항목의 수질농도는 유출량과 비슷한 변화양상을 보였으며, SS 항목의 경우 초기유출이 발생한 후 수질농도가 급격히 낮아지는 결과를 보였다. 이는 강우 발생 시 부유물질이 씻겨 내려가고, 이후 유출량이 많아 졌을 때 SS의 농도가 희석 효과로 인해 낮아진 것으로 판단된다. TCM 지역의 첫 번째 강우사상의 경우 초기유출의 SS 농도가 높게 나타났고,

Table 2. Rainfall-runoff analysis of the monitoring rainfall events

Mine	Event	Date	Antecedent dry day (day)	Rainfall (mm)	Rainfall intensity (mm/hr)	Rainfall duration (hr)	Runoff duration (hr)	Runoff (m^3)	Runoff depth (mm)	Runoff coefficient
DCM	1st	2008.03.23~24	8.2	34.0	1.3	26	26	5,088.4	30.5	-
	2nd	2008.04.09~10	1.3	60.6	2.6	23	23	5,429.4	32.6	-
	3rd	2008.05.18~19	5.3	16.0	0.7	23	23	2,000.2	12.0	-
	4th	2008.05.28	9.3	5.6	0.9	6	6	2,185.1	13.1	-
	5th	2008.06.18	9.0	31.6	1.7	19	19	5,157.3	30.9	-
	6th	2008.06.28~29	6.0	37.4	1.3	30	30	8,712.1	52.3	-
	7th	2008.07.19	1.8	58.4	3.9	15	15	8,735.1	52.4	-
	8th	2008.07.24~26	0.3	167.4	3.1	54	54	33,088.5	198.5	-
	9th	2008.08.22~23	3.7	45.2	1.5	31	31	7,569.2	45.4	-
TCM	1st	2008.03.23~24	3.5	34.6	1.3	26	24	1,612.4	11.6	0.34
	2nd	2008.04.09~10	2.4	41.8	1.7	24	27	1,711.3	12.3	0.30
	3rd	2008.05.18~19	3.1	33.0	4.1	8	9	1,819.2	13.1	0.40
	4th	2008.05.28	9.2	8.8	1.3	7	4	213.0	1.5	0.17
	5th	2008.06.18	8.9	57.0	2.9	20	17	1,482.0	10.7	0.19
	6th	2008.06.28~29	0.7	28.0	0.9	31	21	859.8	6.2	0.22
	7th	2008.07.19	2.1	78.4	5.2	15	18	2,486.6	17.9	0.23
	8th	2008.07.24~26	3.9	248.4	9.6	26	18	7,023.3	50.6	0.20
	9th	2008.08.22~23	3.9	63.0	1.9	34	29	1,473.0	10.6	0.17

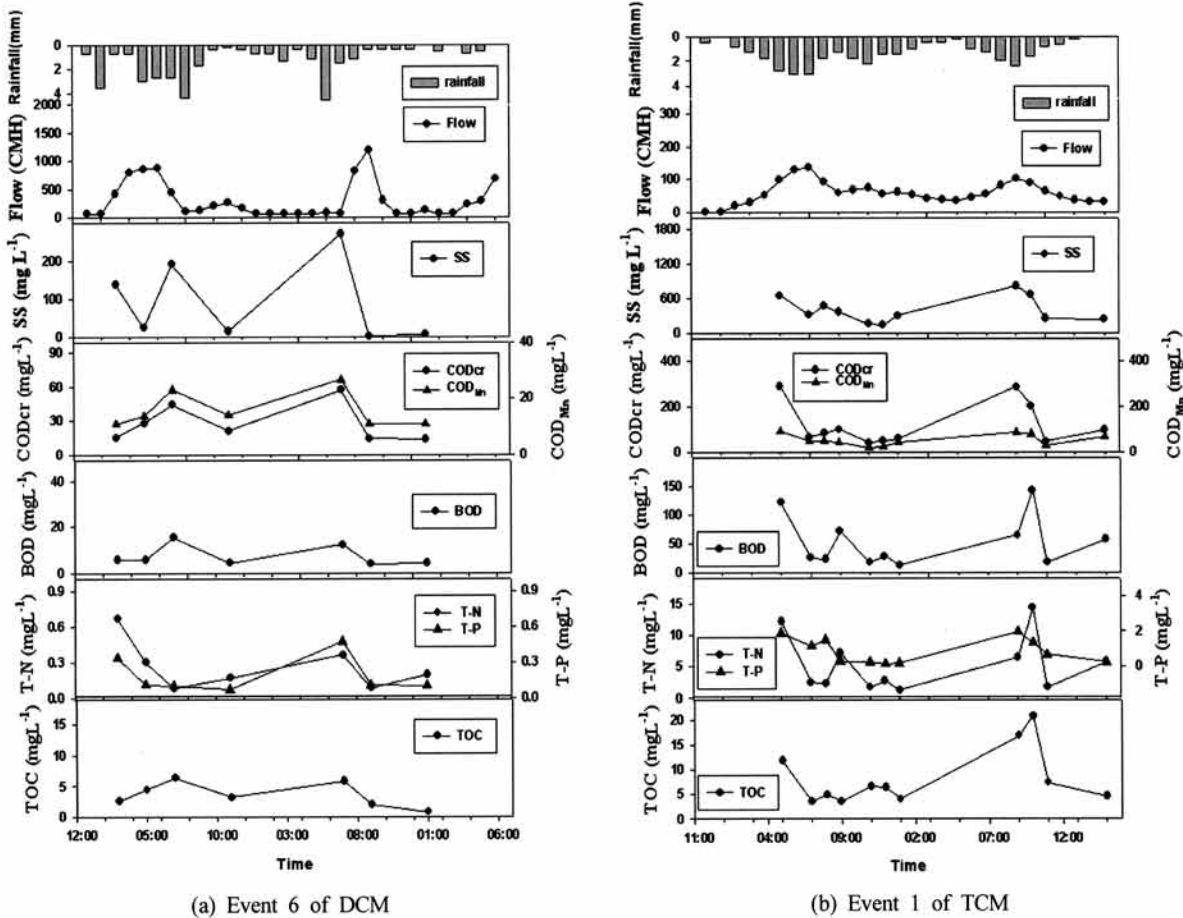


Fig. 2. Pollutant Concentration by DCM, TCM.

강우강도에 따라 SS 농도가 변화하는 것을 알 수 있었다. 또한 SS 뿐만 아니라 TN, TP, TOC, COD_{Cr}의 수질항목들이 초기 유출이 발생하였을 때 높게 나타났다. 이는 강우시 배수로와 저탄장에 덮여있던 비닐캔버스의 부유물질들이 초기 유출수에 포함되어 농도변화가 발생한 것으로 판단된다. TCM 지역은 강우강도가 증가할수록 오염물질의 농도도 증가하고, 감소할수록 오염물질의 농도도 감소하는 경향을 보였다.

TCM과 DCM 지역의 강우 발생시 유출량과 수질농도의 변화를 반영하여 산정된 EMC의 통계 분석결과는 Fig. 3과 같다. BOX 그래프의 최하단은 백분위 25% 값, 최상단은 백분위 75% 값을 의미한다. DCM의 EMC는 SS 23.1~547.1 mg/L, BOD 3.8~55.4 mg/L, COD_{Mn} 6.60~35.08 mg/L, COD_{Cr} 17.78~128.31 mg/L, T-N 0.06~2.10 mg/L, T-P 0.004~2.453 mg/L 그리고 TOC 1.80~7.71 mg/L로 나타났다. TCM의 EMC는 SS 16.5~497.8 mg/L, BOD 7.40~56.00 mg/L, COD_{Mn} 9.43~106.80 mg/L, COD_{Cr} 29.98~263.94 mg/L, T-N 0.15~5.60 mg/L, T-P 0.101~1.462 mg/L 그리고 TOC 1.70~11.67 mg/L로 나타났다. 채광작업이 이루어지는 갱구부(DCM)의 오염농도와 변화폭은 저탄장(TCM)보다 일반적으로 낮게 나타났다. 이는 DCM지역의 갱내수와 냉각수의 오염물질 농도가 낮아 희석효과가 있었기 때문으로 판단되었다.

3.3. 오염부하 산정

Fig. 4에는 DCM과 TCM지역의 강우사상별 오염부하를 나타내었으며, Table 3에는 이들 자료에 기초한 연간오염부하를 제시하였다. DCM의 2008년 7월 24일~26일의 여덟 번째 강우사상에 대한 오염부하는 SS가 1,085.7 kg, BOD 9.47 kg, COD_{Mn} 22.27 kg, COD_{Cr} 254.63 kg, T-N 1.53 kg, T-P 0.700 kg 그리고 TOC 6.88 kg로서 다른 강우사상과 다르게 높게 나타났다. 엄미정 등(2008)은 집중호우에 의한 강우량 증가의 영향으로 조사시기의 강수량과 강우유출 특성의 차이가 다양하게 나타난다고 하였다. 따라서 여덟 번째 강우사상은 3일 연속적으로 내린 167.4 mm의 강우로 인한 유량의 차이와 3.10 mm/hr의 강우강도, 그리고 높은 수질농도에 의한 것으로 확인되었다. 또한 DCM 지역은 상시흐름으로 산정된 오염부하를 비교하였을 때 TCM보다 DCM의 오염부하가 높게 나타났다. 이는 DCM에서 지속적으로 배출되는 청소용수와 세류시설에서 발생하는 오수, 갱내수, 냉각수에 비점오염물질 등과 같은 점오염원으로 분류되는 갱내수의 냉각수가 포함되어 있기 때문으로 판단된다.

3.4. 상관관계

Table 4에는 통계 프로그램인 SAS 9.1을 이용하여 분석한 유량과 수질 농도들 사이의 상관관계를 제시하였다. 상

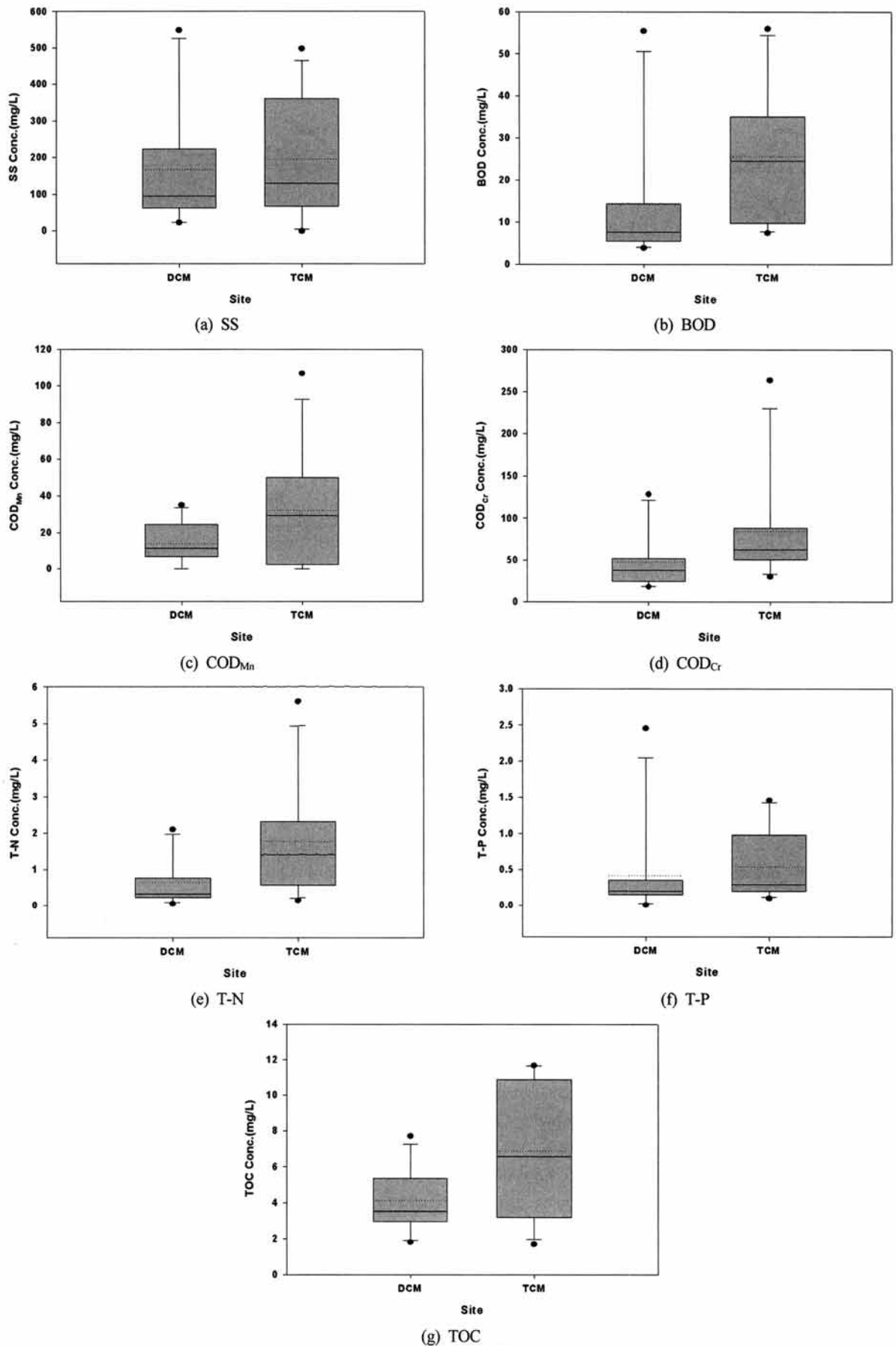


Fig. 3. Statistical summaries of EMC each of the DCM and TCM.

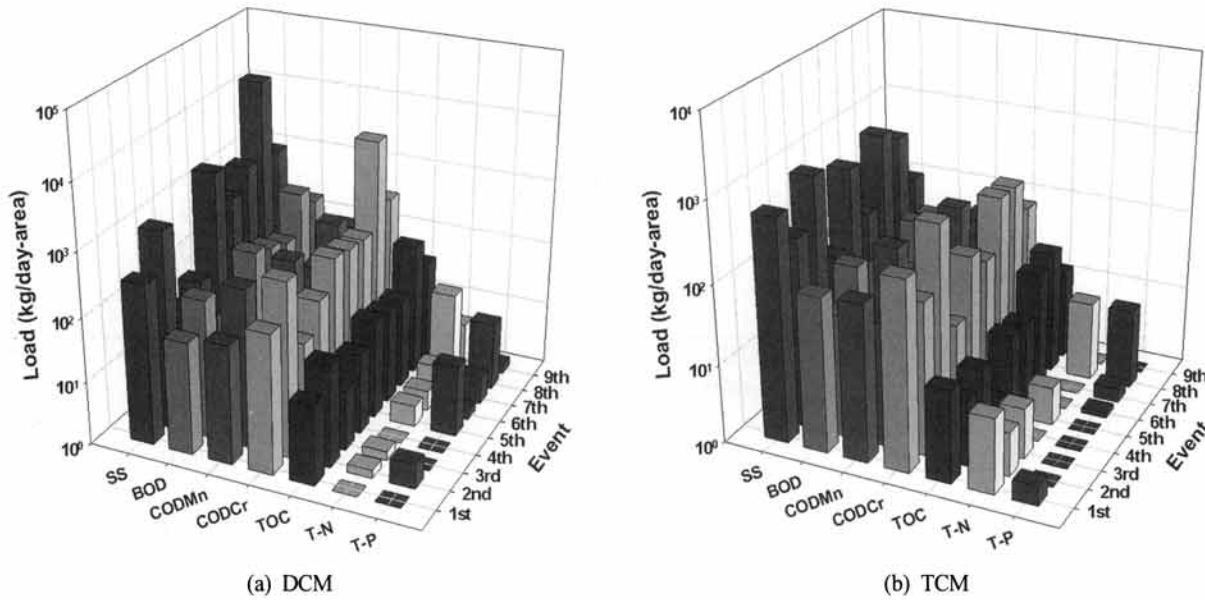


Fig. 4. Pollutant Loads by DCM, TCM.

Table 3. Annual pollutant loadings from DCM and TCM Watersheds

	SS (kg/year)	BOD (kg/year)	COD _{Mn} (kg/year)	COD _{Cr} (kg/year)	T-N (kg/year)	T-P (kg/year)	TOC (kg/year)
DCM	176,911.1	13,787.4	17,445.2	48,874.4	5,574.2	346.4	6,431.3
TCM	4,859.2	588.7	794.4	2,033.4	44.5	20.9	170.8

Table 4. Correlation analysis result of flow and pollutant concentration values

		Flow	SS	BOD	COD _{Mn}	COD _{Cr}	T-N	T-P	TOC
DCM	Flow	1	0.244*	-0.151	-0.105	0.069	0.003	-0.026	-0.116
	SS		1	0.435**	0.623**	0.733**	0.211*	0.546**	0.186
	BOD			1	0.822**	0.718**	0.020	0.361**	0.565**
	COD _{Mn}				1	0.698**	0.107	0.545**	0.525**
	COD _{Cr}					1	0.258*	0.241*	0.381**
	T-N						1	0.075	0.034
	T-P							1	0.149
	TOC							1	
TCM	Flow	1	-0.088	-0.197	-0.166	-0.070	-0.088	0.376*	-0.214
	SS		1	0.617**	0.658**	0.718**	0.498**	0.100	0.247
	BOD			1	0.581**	0.653**	0.845**	0.122	0.427**
	COD _{Mn}				1	0.934**	0.389**	-0.055	0.235
	COD _{Cr}					1	0.488**	0.065	0.213
	T-N						1	0.216	0.234
	T-P							1	0.111
	TOC							1	

* and ** are statistically significant at p<0.01(**) and at p<0.05(*), respectively

관계수는 -1에서 +1까지의 값을 갖는데, -1 또는 1의 관계를 갖는 경우 완전상관이라고 하며 0인 경우는 무상관이라고 한다. 원철희 등(2009)에 의하면 상관관계수의 절대값이 0.6 이상일 경우 상관관계가 높다고 말하며 0.3 이하는 상관관계가 낮다고 하였다. Table 5에는 일오염부하량과 일유량의 상관관계를 나타냈다. DCM의 유출량과 SS는 약한 양의 상관관계가 있으며, BOD, COD_{Mn}, COD_{Cr}, T-N, T-P 그리고 TOC는 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 이는 DCM의 유량은 갭내수와 기계실에서 사용하는 냉각수의

영향에 의하여 유출량의 변동이 심하기 때문에 수질농도와 상관관계가 매우 낮게 나타난 것으로 판단된다. SS농도와 COD_{Mn}, COD_{Cr}, 그리고 BOD-COD_{Mn}, BOD-COD_{Cr}의 상관관계, COD_{Mn}-COD_{Cr}의 상관관계는 유의수준 0.01에서 0.6 이상 높은 값을 보였다. 다른 오염농도 사이에는 유의수준 0.05에서 많은 항목들이 양의 상관관계에 있었다. 일유량과 강우사상별 농도분석의 상관관계와 달리 일오염부하량과 일유량의 상관관계는 SS, BOD, COD_{Cr}, T-N, 그리고 TOC 농도가 유의수준 0.01에서 높은 상관관계가 있는

Table 5. Correlation analysis result of flow and pollutant loads

		Flow	SS	BOD	COD _{Mn}	COD _{Cr}	T-N	T-P	TOC
D	Flow	1	0.901**	0.887**	0.188	0.917**	0.785**	0.561	0.887**
	SS		1	0.872**	0.301	0.9912**	0.511	0.684*	0.964**
	BOD			1	0.541	0.866**	0.873**	0.752*	0.956**
C	COD _{Mn}				1	0.317	0.002	0.478	0.476
	COD _{Cr}					1	0.546	0.615*	0.964**
M	T-N						1	0.326	0.494
	T-P							1	0.692*
	TOC								1
T	Flow	1	0.295	0.311	0.298	0.179	0.689*	0.922**	0.786**
	SS		1	0.940**	0.878**	0.876**	0.534	0.231	0.563
	BOD			1	0.888**	0.874**	0.661*	0.302	0.597*
C	COD _{Mn}				1	0.957**	0.523	0.211	0.418
	COD _{Cr}					1	0.245	-0.008	0.305
M	T-N						1	0.713**	0.561
	T-P							1	0.801**
	TOC								1

* and ** are statistically significant at $p < 0.01$ (**) and at $p < 0.05$ (*), respectively

것으로 나타났다.

TCM은 저탄시설의 피복효과로 인하여 강우시 초기세척이 크게 일어나는 것으로 판단되며, 유출초기에 오염물질이 대부분 제거되어 수질농도와 유량은 큰 상관관계가 없는 것으로 사료된다. COD_{Mn}-COD_{Cr}의 상관계수는 0.934으로 유의수준 0.01에서 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났으며, SS, COD_{Cr}, COD_{Mn} 그리고 BOD 사이에는 유의수준 0.05에서 높은 상관관계가 있었다. 또한 TCM의 일오염부하량과 일유량의 상관관계는 T-N, T-P, 그리고 TOC 농도가 유의수준 0.01에서 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

4. 결론

강우사상에 따른 가행광산 지역의 비점오염원 모니터링을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) DCM에서 발생하는 비점오염원의 경우 강우에 의한 오염배출보다 작업장에서 배수되는 갭내수의 영향이 컸다. 이들 갭내수와 냉각수에 의한 오염부하는 추가적인 장비설치와 수질분석으로 비점오염부하와 분리하기 위한 연구를 수행할 필요가 있다.
- 2) DCM의 여덟 번째 강우사상에 대한 오염부하는 다른 강우사상과 다르게 높게 나타났다. 이는 3일 연속적으로 내린 167.4 mm의 강우로 인한 유량의 차이와 3.10 mm/hr의 강우강도, 그리고 높은 수질농도에 의한 것으로 확인되었다. 또한 DCM과 TCM의 강우시 발생하는 오염부하와 연간오염부하를 비교하였을 때 TCM보다 DCM의 오염부하가 높게 나타났다. 이는 DCM에서 지속적으로 배출되는 유량에 비점오염물질이 포함되었기 때문인 것으로 판단된다.
- 3) DCM의 유량-농도의 상관관계는 SS-COD_{Mn}, SS-COD_{Cr}, 그리고 BOD-COD_{Mn}, BOD-COD_{Cr}의 상관관계, COD_{Mn}-

COD_{Cr}의 상관관계는 0.6 이상 높은 값을 보였다. TCM의 유량-농도의 상관관계는 유출초기에 오염물질이 대부분 제거되어 유량과 큰 상관관계가 없는 것으로 판단된다. 그러나 COD_{Mn}-COD_{Cr}과 상관계수 0.934으로 유의수준 0.01의 관계를 나타내었으며 일 오염부하량과 일 유량의 상관관계는 T-N과 T-P 그리고 TOC 농도가 유의수준 0.01에서 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

- 4) 본 연구는 2008년 3월부터 2009년 2월까지 12개월 동안의 강우유출수를 조사한 결과로 평균적인 자료로 판단하여 활용하기는 어렵다. 또한 가행 석탄광산만을 연구한 자료로 모든 가행광산에 적용하기에는 어렵다. 그러나 지속적인 장기 모니터링을 통해 수질분석과 유량 자료를 구축하고, 타 가행광산을 모니터링하여 비교하면, 가행광산 지역의 비점오염부하 산정 시 유용한 자료로 활용이 가능할 것으로 생각되고, 향후 비점오염을 포함한 유역관리에 이용될 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한강수계관리위원회, 국립환경과학원 한강물환경연구소에서 시행한 환경기초조사사업의 연구의 지원으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

- 강신권, 김태균(2008). 지역별 강우분포를 고려한 블록포장 지역의 유출계수 산정에 관한 연구. *한국조경학회지*, 36(4), pp. 111-119.
- 광해방지사업단(2009). <http://www.kmrc.or.kr/>.
- 국립환경과학원(2009). *강우유출수 조사방법*.
- 김상단, 강두기, 김문수, 신현석(2007). 유역모형 구축을 위한 8일 간격 유량측정자료의 일유량 확장 가능성. *수질*

- 보전 *한국물환경학회지*, **23**(1), pp. 64-71.
- 김이형, 강주현(2004). 강우시 발생하는 고속도로 유출수의 초기유수 특성 및 기준. *수질보전 한국물환경학회지*, **20**(6), pp. 641-646.
- 신민환, 신용철, 허성구, 임경재, 최중대(2007). 농업 및 산림유역의 강우유출수 유량가중평균농도 분석. *한국농공학회논문집*, **49**(6), pp. 3-9.
- 신용철, 류창원, 최예환, 임경재, 최중대(2006). 농업소하천 유역의 기저유출에 의한 오염부하특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **22**(2), pp. 244-249.
- 신은성, 최지용, 이동훈(2001). 토지용도와 유역특성을 고려한 비점오염물질 원단위 산정에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **17**(2), pp. 137-146.
- 엄미정, 문영훈, 안병구, 신용규(2008). 전북지역 농업용 하천유역의 수질과 부하량 특성. *한국환경농학회지*, **27**(2), pp. 111-119.
- 오재일, 조인성, 안남규, 김태형(2005). 석탄폐광석 적치장의 비점오염 수질조사 및 사면 안정성 평가. *대한토목학회 논문집*, **25**(4B), pp. 317-324.
- 원철희, 최용훈, 서지연, 김기철, 신민환, 최중대(2009). 산림과 밭 지역 강우 유출수의 EMC 및 원단위 산정. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(4), pp. 615-623.
- 이치타오, 허진휴, 김영철(2008). 농촌지역에서 유출시간에 따른 비점오염물질의 유출평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(6), pp. 773-783.
- 이현준, 김효진, 오현주, 정진호(2006). 광산배수의 물리화학적 특성과 생물독성간의 상관관계 해석. *공동춘계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 534-540.
- 임길재(2002). 폐탄광 광산배수 자연정화처리시설 정화효율성 평가 사례 연구. *한국지구시스템공학회지*, **39**(2), pp. 112-118.
- 정동환, 신동석, 류덕희, 정동일(2007). 도시지역 강우유출수에서 비점원 오염물질 EMC 분석. *추계학술연구발표회 논문집*, 대한환경공학회, pp. 318-320.
- 조영도, 김형석, 안지환(2007). 석탄광산배수에 함유된 중금속 이온의 침전 특성. *한국광물학회지*, **20**(2), pp. 125-134.
- 주진호, 정영상, 양재의, 옥용식, 오상은, 유경렬, 양수찬(2007). 낙동강 수계 고령지 밭의 비점오염 물질 유출 특성 조사 및 단위 유출량 산정. *한국환경농학회지*, **26**(3), pp. 233-238.
- 최중대(1999). 토지이용이 농업소유역의 수질에 미치는 영향. *한국수자원학회논문집*, **32**(4), pp. 501-510.
- 환경부(2003). *환경백서*.
- 환경부(2005). *수질오염공정시험법*.
- U. S. EPA. (1983). Result of the Nationwide Urban Runoff Program, Water Planning Division, U. S EPA. Washington DC. **1**, Final Report.