

규사광산 지역의 강우시 비점오염원의 유출분석

최용훈 · 원철희* · 서지연 · 신민환** · 양희정*** · 최종대†

강원대학교 지역건설공학과

*강원대학교 환경연구소

**국립환경과학원 금강물환경연구소

***국립환경과학원 한강물환경연구소

Analysis of NPS Pollution Loads over Rainfall-Runoff Events from the Silica Mine Site

Yong-hun Choi · Chul-hee Won* · Ji-yeon Seo · Min-Hwan Shin** · Hee-Jeong Yang*** · Joong-dae Choi†

Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

*Institute of Environmental Research, Kangwon National University

**Geum River Environment Research Center, National Institute of Environment Research

***Han River Environment Research Center, National Institute of Environment Research

(Received 2 November 2009, Revised 4 March 2010, Accepted 8 March 2010)

Abstract

A silica mine monitoring was conducted from March to December in 2008 to measure rainfall, runoff amounts and pollution loads. A total of 13 rainfall-runoff events were measured and analyzed with respect to runoff ratio, pollutant concentration and load, and initial flush. Over rainfall-runoff events, 95% confidence range of SS concentration was 942.5~2,056.2 mg/L. Other measured water quality indices also showed relatively large variation. This wide concentration variation was thought to be caused by the bare working ground of the mine that was used to store, process and transport the mined silica. Total pollution load of the 13 rainfall-runoff events was SS 17,901 kg/ha, COD_{Cr} 160.9 kg/ha, COD_{Mn} 111.24 kg/ha, BOD 79.6 kg/ha, T-N 13.8 kg/ha, T-P 3.5 kg/ha, and TOC 39.3 kg/ha. Initial flush was not well observed except SS. Very high SS concentration and load was occurred when rainfall was large. Therefore, it was recommended to manage the bare ground not to discharge excessive pollutants during wet days by covering the ground or constructing runoff treatment systems such as a sediment basin.

keywords : Non-Point Source (NPS), Pollutant load, Rainfall runoff, Silica mine, Water quality

1. 서론

우리나라는 2007년부터 세분류 토지이용별 비점오염부하 원단위 산정을 위한 과학적 근거를 제공하고자 유역단위 연구에서 개별 토지이용별 모니터링을 실시하고 있다. 또한 비점오염 통합모니터링 및 감시체계의 구축, 비점오염 원단위 산정을 통한 수질오염총량제의 효과적인 추진에 기여하고, 비점오염원의 최적저감기법을 제시하는 것은 매우 중요하다. 이의 일환으로 가평광산지역에서 발생하는 비점오염 부하에 관측의 필요성이 대두되고 있다.

환경부의 세분류 중에서 채광지역에 관한 연구는 주로 폐광산 지역의 산성폐수와 하류지역의 중금속 오염에 대한 연구가 1970년대부터 시작해 현재까지 활발히 진행되고 있다. 광산의 산성배수와 광재댐 그리고 지하침출수에 대하여 오염특성과 침출수 등의 처리에 관한 광해방지사업과 연계한 연구들이 주로 다루어져왔다(김순오 등, 2006; 김연태 등, 2006; 정구복 등, 2008; 조규송, 1971; 지상우 등, 2005).

오재일과 심연식(2003)은 국내 발생 산성광산배수의 광종별(석탄/금속광산) 수질 특성을 파악하고자 기존 광산배수 수질 자료를 바탕으로 비교하고 분석하였을 뿐 강우시 비점오염에 관한 연구는 많지 않다. 또한 현행, 휴·폐 광산 모두 산지에 위치하여 개발되고 지하채굴뿐만 아니라 일부는 노천채굴을 실시하기 때문에 토지피복이 산림에서 나지로 바뀌며 강우에 의해 석재와 유사 등의 심각한 비점오염 문제가 발생할 수 있다. 따라서 강우시 광산지역의 비점오염에 대하여 조사할 필요성이 있다.

본 연구에서는 환경부에서 제시한 토지피복 항목 중 대분류 나지, 중분류 채광지역, 세분류 기타광물질채취장에 속하는 규사채취광산을 모니터링하여 강우-유출해석, 수질농도변화, 오염부하, 초기세척효과 그리고 유량가중평균농도(Flow Weight Mean Concentration, FWMC) 등의 비점오염특성을 조사하고 분석하였다. 비점오염원은 유역의 상태, 지리적 특성, 기상인자 및 기타 요인의 영향을 받으며, 강우강도, 강우지속시간, 강우수질, 유달거리 등에 따라 비점오염의 배출 정도가 달라지기 때문에 많은 조사와 자료를 필요로 한다(최중대 등, 1999). 또한 조사된 자료와 분석된

† To whom correspondence should be addressed.

jdchoi@kangwon.ac.kr

결과는 토지이용별 비점오염부하의 산정과 저감기술의 개발에 활용될 수 있으며, 수질오염총량제의 신뢰성을 향상시킬 것으로 판단된다.

2. 연구방법

2.1. 연구지역

연구지역은 강원도 홍천군 북방면 능평리에 위치한 규사광산으로 유역 면적은 46.0 ha이다(Fig. 1). 환경부에서 제공하는 중분류 토지이용도에서 연구유역의 토지이용은 산림과 밭으로 되어 있으나, 실제로는 산림과 작은 소하천 그리고 규사를 채취하여 보관 및 가공 작업을 하는 나지로 구분된다. 그러나 규사를 보관하고 가공하는 작업장(나지)의 면적은 1 ha 미만으로 유역면적에 비하여 매우 작았다. 강우에 의한 유출량과 수질샘플을 채취하기 위한 모니터링 시설은 채광작업과 규사 가공작업이 이루어지는 계곡의 하류로 평시에 약 500 m³/day의 유량이 흐르는 작은 소하천에 설치하였다. 소하천의 상류부에는 작은 못이 있지만 저류지의 기능을 할 정도로 크지는 않다.

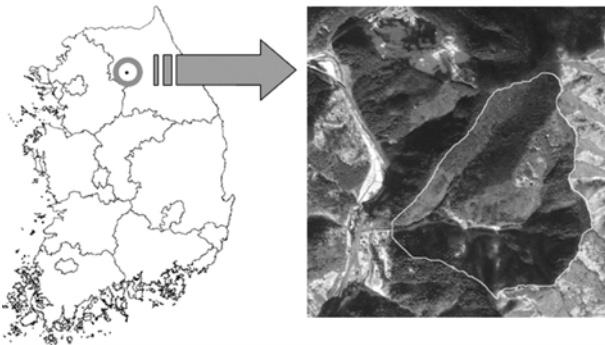


Fig. 1. Location and watershed of study area.

2.2. 조사 방법

규사광산지역에서의 모니터링은 2008년 3월부터 12월까

지 총 13회의 강우사상에 대하여 실시되었다. 강우량은 모니터링 지점에 설치된 자기우량계의 자료를 사용하였다. 하천의 단면이 불규칙하기 때문에 웨어를 설치하고 유량을 측정하였다. 유량 측정은 수위와 유속을 동시에 측정할 수 있는 유량계를 설치하여 15분 간격으로 측정하였다. 수질 시료 채취는 강우 시작전 1회와 강우 종료후 1회 그리고 강우시 30분 혹은 1시간 간격으로 채취하였다. 수질시료의 분석항목은 SS, COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD₅, TOC, TN, TP 등을 Standard Methods (APHA et al., 1995)와 수질오염 공정시험법(환경부, 2001)에 따라 분석하였다. 13회의 강우사상에 대한 강우-유출 및 농도변화를 해석하고, 오염부하를 계산하였다. 초기세척효과는 유출-부하 누적곡선과 유출-강우 누적곡선을 이용하여 분석하였고, FWMC는 총오염부하를 총유량으로 나누어 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 강우 특성

관측한 13회의 강우사상에 대한 유출특성을 분석하였다 (Table 1). 2008년 3월부터 12월까지 관측된 13회의 강우량은 6.5 ~ 149.0 mm, 선행무강우일수는 1.3 ~ 9.8일, 강우지속시간은 4.9 ~ 46.3시간, 평균강우강도는 0.5 ~ 4.7 mm/h, 유출심은 2.2 ~ 139.1 mm이며, 유출계수는 0.28 ~ 0.98의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 규사광산지역의 13회 강우사상의 총 강우량은 712.6 mm이며, 총 유출심이 476.1 mm로 총 유출률은 0.67로 매우 크게 나타났다. 총 유출률이 0.67로 높은 것은 3회 발생한 100 mm이상의 강우사상에 대한 유출계수가 0.77 ~ 0.98%로 매우 높았기 때문인 것으로 판단된다.

유출율은 일반적으로 강우량과 강우강도가 증가하고 선행무강우일수가 감소할 때 증가하는 경향을 보인다(이현동 등, 2001). 따라서 동일한 강우량에서 강우강도의 증가와 선행무강우일수의 감소는 유출율의 증가 효과를 가져 올

Table 1. Analysis of rainfall and runoff data

Event	Date	Rainfall (mm)	Antecedent dry day (day)	Duration (h)	Rainfall intensity (mm/h)		Runoff depth (mm)	Runoff coefficient
					Avg.	Max.		
1	08.03.22 ~ 24	44.0	7.5	29.3	1.5	3.5	13.5	0.30
2	08.04.09 ~ 10	6.5	2.8	13.0	0.5	2.0	2.2	0.34
3	08.05.18 ~ 19	33.0	5.2	13.2	2.5	8.8	19.0	0.58
4	08.06.02 ~ 03	12.2	2.8	4.9	0.7	2.4	4.0	0.29
5	08.06.18 ~ 20	33.0	5.3	8.9	3.7	8.8	22.5	0.68
6	08.06.28 ~ 29	33.4	6.4	18.6	1.8	5.4	11.0	0.34
7	08.07.02 ~ 03	19.2	3.2	11.3	1.7	7.8	10.0	0.52
8	08.07.16 ~ 17	13.4	1.3	11.2	1.2	5.6	6.6	0.49
9	08.07.19 ~ 21	149.0	2.5	45.2	3.3	22.0	116.8	0.78
10	08.07.24 ~ 25	141.9	2.3	30.2	4.7	14.0	139.1	0.98
11	08.08.02 ~ 03	33.0	2.5	8.9	3.7	7.0	9.3	0.28
12	08.08.22 ~ 24	139.0	2.8	46.3	3.0	10.0	107.1	0.77
13	08.09.01 ~ 02	55.0	9.8	22.9	2.4	9.0	15.6	0.30
All event		712.6	-	276.4	2.6	-	476.1	0.67

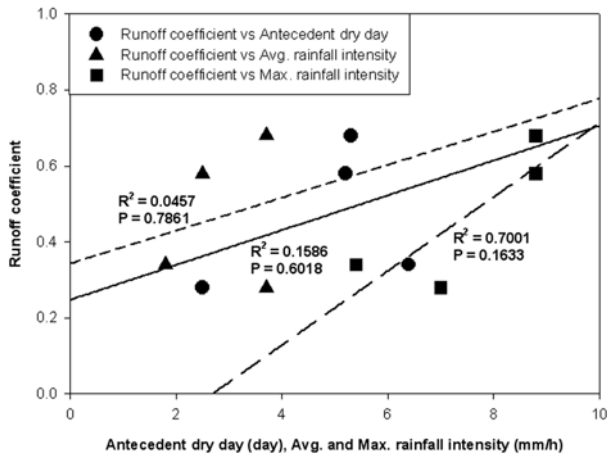


Fig. 2. Changes of runoff coefficient with weather conditions (Antecedent dry day, Avg. and Max. rainfall intensity); Precipitation-33 mm rainfall.

것으로 판단된다. 본 연구지역의 13회의 강우사상 중 유사한 강우량(33 mm)을 나타낸 4회의 강우사상의 선행무강우일수와 강우강도를 비교하였다(Fig. 2). 분석된 결과 선행무강우일수와 강우강도가 증가할 때 유출율도 증가하는 경향은 나타났지만, 통계적 유의수준인 P 값이 0.05보다 크기 때문에 통계적으로 큰 의미를 갖지는 못한다.

선행무강우일수가 감소할 때 유출율이 증가하는 경향을 일반적으로 보이지만 연구지역에서는 일반적인 경우와 반대의 경향이 나타났다. 이것은 연구지역에서 선행무강우일수가 유출율에 큰 영향을 주지 못하며, 다른 기상 인자가 유출율에 더 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 최대강우강도의 R²가 가장 크고, P 값이 가장 작은 것으로 나타났기 때문에 유출율에 가장 큰 영향을 주는 것으로 판단할 수 있다.

이러한 결과는 채석과 가공 등의 작업과 채석장 주변 환경 조건이 수시로 변화하기 때문인 것으로 판단된다. 현장의 형태와 조건이 수시로 바뀌는 지역의 정확한 유출특성을 파악하기 위해서는 장기간의 연구를 통한 더 많은 자료의 축적이 요구된다.

3.2. 수질 농도 변화

강우시 수질농도 결과에 대한 평균, 표준편차, 95% 신뢰구간 그리고 변동계수를 산정하였다(Table 2). 강우시 SS의 95% 신뢰구간은 2,056.25 ~ 942.53 mg/L이고, 변동계수가 188.54%로 가장 컸다. 또한 TP의 95% 신뢰구간은 0.83 ~

0.46 mg/L이고, 변동계수는 143.64%로 나타났다. 반면 COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD₅, TOC의 변동계수는 50% 이하로 작게 나타났다. 노천채굴과 규사의 가공작업으로 인하여 토지이용이 산림에서 나지로 변화되었기 때문에 다른 오염물질농도보다 SS 농도의 변동계수가 큰 것으로 판단된다. 또한 연구지역의 배후지인 산림에서 먼지와 낙엽 등의 퇴적물들이 지표유출수와 함께 하천으로 유입되어 SS 농도에 영향을 주는 것으로 사료된다.

3.3. 오염부하

강우사상별 오염부하를 계산하였다(Table 3). 13회의 강우사상동안 발생한 오염부하의 범위는 SS 0.27 ~ 12,480.10 kg/ha, COD_{Cr} 0.19 ~ 47.92 kg/ha, COD_{Mn} 0.07 ~ 34.39 kg/ha, BOD₅ 0.09 ~ 23.12 kg/ha, TOC 0.07 ~ 10.37 kg/ha, TN 0.02 ~ 5.14 kg/ha, TP 0.002 ~ 1.21 kg/ha로 나타났다. 13회 강우사상의 총 오염부하는 SS 17,901.5 kg/ha, COD_{Cr} 160.91 kg/ha, COD_{Mn} 111.24 kg/ha, BOD₅ 79.68 kg/ha, TN 13.81 kg/ha, TP 3.502 kg/ha, TOC 39.32 kg/ha으로 나타났다. 강우가 증가함에 따라 COD_{Cr}과 BOD₅ 그리고 TOC도 증가하는 경향을 나타내는 반면 SS와 TP는 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타나지는 않았다.

SS의 발생은 강우 타격력과 선행강우의 영향을 많이 받는다. 9차와 10차의 평균 강우강도는 3.3 mm/h와 4.7 mm/h로 10차가 1.4배 크지만 최대 강우강도는 22.0 mm/h와 14.0 mm/h로 9차가 1.6배 크다. 따라서 강우 타격력의 차이에 따른 설명은 쉽지 않다. 하지만 선행강우는 강우강도와 비교할 때 확연히 다르다. 9차의 선행강우는 13.4 mm인 것에 비해 10차의 선행강우는 149.0 mm로 11배 이상의 차이를 나타냈다. 9차에 비해 10차 강우사상의 선행강우가 매우 많기 때문에 쉽게 유출이 일어나며, 유출 증가에 따른 토사유실의 증가로 SS 농도가 높게 나타나 비슷한 유출량에도 오염부하가 크게 나타난 것으로 판단된다.

연구지역에서 발생한 비점오염부하의 특성은 다른 수질 항목에 비해 SS 부하가 매우 크다는 것이다. 강우가 집중된 9차와 10차 강우사상에서 발생한 SS 부하는 총 SS 부하의 90% 이상을 차지하는 것으로 산정되었다. 다른 수질 항목이 9차와 10차 강우사상에서 40 ~ 50%를 차지하는 것과는 매우 대조적이다. 노천 채굴과 작업장 주변의 환경조건(나지)에 의해 SS 부하가 매우 크게 산정된 것으로 판단된다. 따라서 연구지역과 유사한 지역은 SS를 줄이기 위한 비점오염 저감 시설이 우선적으로 필요하다. 비점오염은 총

Table 2. Statistics of non-point source pollutant

	Avg. conc. (mg/L)	Standard deviation	Upper limit (mg/L)	Lower limit (mg/L)	Coefficient of variation (%)
SS	1,499.39	2,826.89	2,056.25	942.53	188.54
COD _{Cr}	27.94	13.27	30.55	25.32	47.50
COD _{Mn}	18.38	10.61	20.47	16.29	57.76
BOD ₅	13.44	5.07	14.44	12.45	37.68
TOC	7.38	2.72	7.91	6.84	36.90
TN	3.27	3.41	3.94	2.60	104.26
TP	0.65	0.93	0.83	0.46	143.64

Table 3. Estimated pollutant loads for rainfall-runoff events

(Unit : kg/ha)

Event	SS	COD _{Cr}	COD _{Mn}	BOD ₅	TOC	T-N	T-P
1	14.90	2.37	1.27	1.15	0.39	2.17	0.02
2	0.27	0.19	0.07	0.09	0.07	0.21	0.002
3	180.81	10.85	7.73	3.37	0.97	1.23	0.05
4	16.78	0.87	0.11	0.47	0.24	0.02	0.04
5	183.19	18.83	8.98	8.01	3.32	0.14	1.21
6	5.11	3.03	2.60	1.80	1.26	0.19	0.02
7	8.28	2.43	2.10	1.50	0.81	0.22	0.04
8	20.17	1.71	1.44	0.89	0.30	0.14	0.04
9	3,822.74	34.92	23.91	16.28	9.16	5.14	0.36
10	12,480.10	47.92	34.39	23.12	10.37	0.76	1.18
11	24.47	2.86	2.05	1.44	0.91	0.13	0.03
12	867.53	31.74	24.30	19.99	10.18	2.33	0.43
13	277.21	3.19	2.29	1.57	1.11	1.13	0.08
Avg.	1,377.04	12.38	8.56	6.13	3.02	1.06	0.27
Total	17,901.50	160.91	111.24	79.68	39.32	13.81	3.50

량관리가 중요하기 때문에 작은 강우뿐만 아니라 큰 강우에 대비한 시설이 설계되고, 설치되어야 비점오염 저감 시설의 목적을 달성할 수 있을 것이다.

유출고와 오염부하의 관계를 Fig. 3에 나타냈다. 유출고가 증가함에 따라 SS와 COD_{Cr} 부하는 증가하는 경향이 잘 나타났다. 특히 다른 수질 항목에 비해 SS 부하는 유출고가 100 mm 이상 증가할 때 매우 급격하게 오염부하가 증가하였다. 노천채굴에 의해 산림지역이 훼손되고, 채석과 가공 작업으로 인해 발생한 오염물질(토사 및 규석)을 작업장에 방치하기 때문에 큰 강우의 발생시 채석장과 작업장 주변의 토사가 쉽게 유실된다. 또한 산림지역의 특성상 유출이 집중되고, 강우유출수의 유속이 증가하여 토사의 세굴을 가속화하기 때문에 SS 부하가 급격하게 증가한 것으로도 판단할 수 있다. 따라서 연구지역과 같은 노천 광산 지역의

토사 유실을 방지하기 위한 관리가 반드시 필요하다. 반면 TN 부하는 유출고와 일정한 관계가 없는 것으로 확인되었다. 유출고와 TP 부하의 관계에서 5차 강우사상을 제외하면 유출고에 따라 오염부하가 증가하는 경향을 보였다.

3.4. 초기세척효과

누적부하곡선은 강우초기에 발생하는 강우유출수내에 포함된 다양한 오염물질들의 초기세척효과를 분석하기 위해 사용되고 있다. 하지만 오염물질의 경향을 모두 표현하는 것에는 제한이 있다(이흥신과 이승환, 2009). 초기세척효과는 강우사상동안 발생한 총 유출에 대한 누적 유출비를 x축으로, 총 오염부하에 대한 누적 오염부하비를 y축으로 도시하여 곡선의 기울기가 1보다 클 경우 초기세척효과가 있는 것을 의미하고, 1보다 작은 경우 초기세척효과가 없

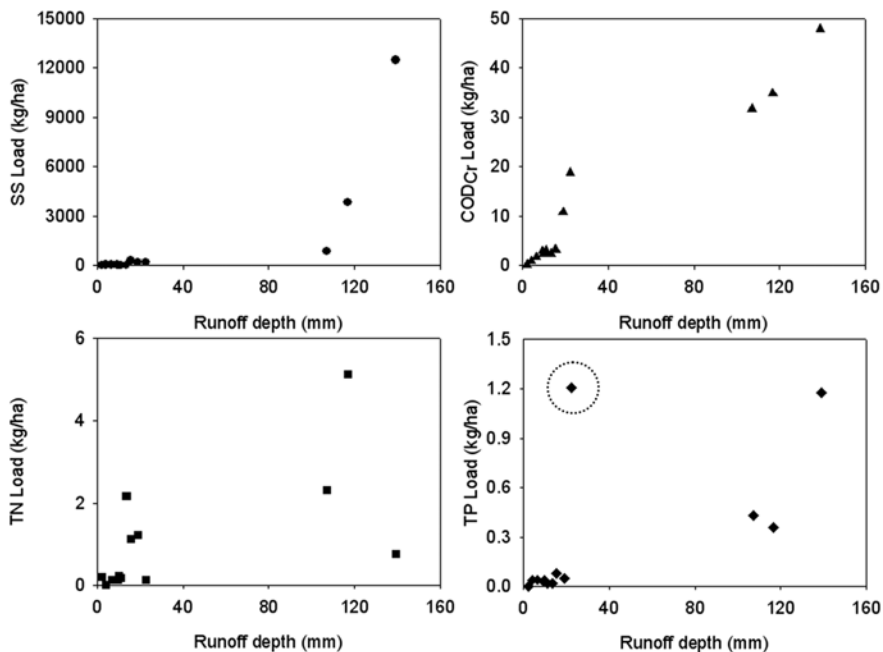


Fig. 3. Pollutant loads with runoff depth.

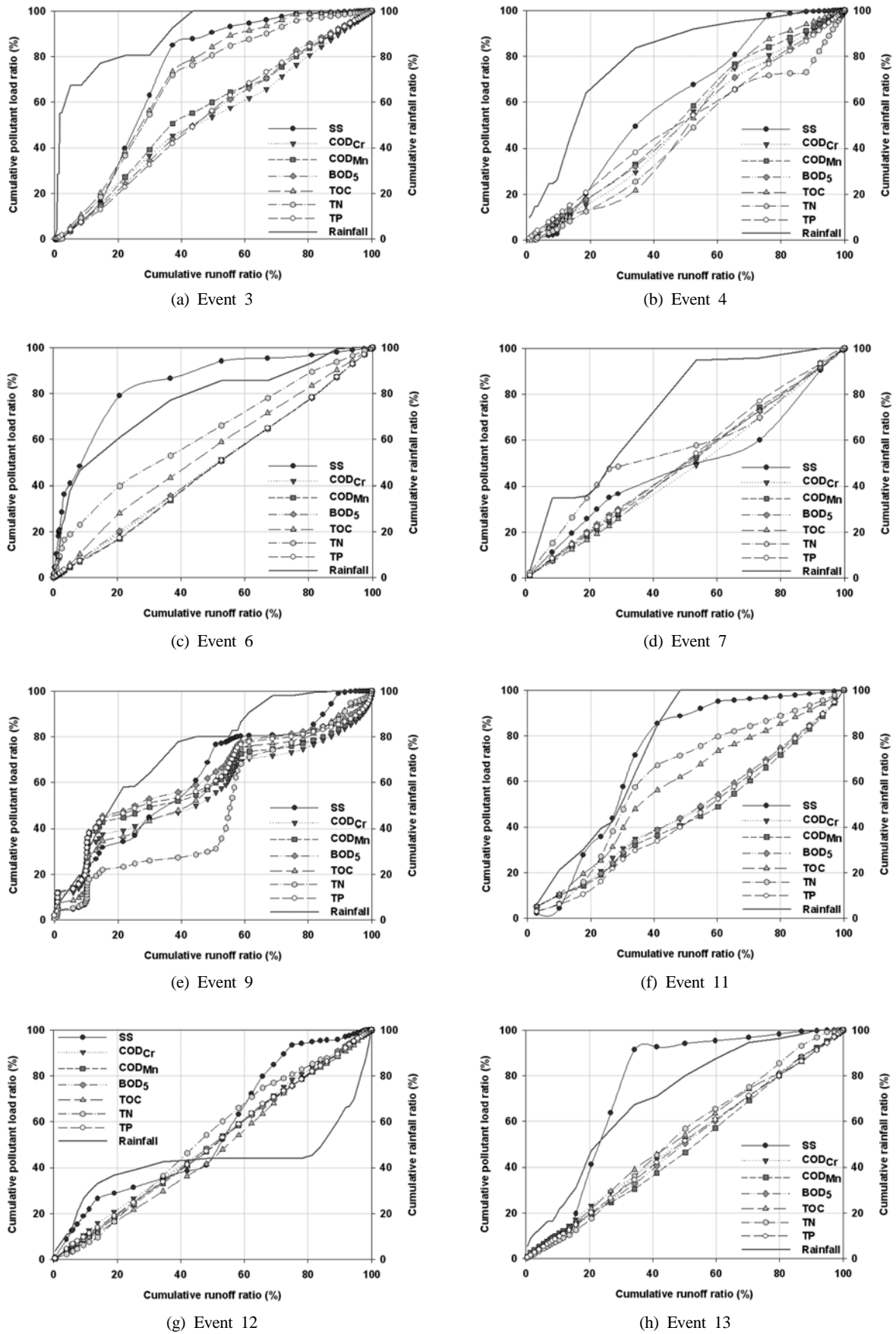


Fig. 4. Comparison of cumulative runoff ratio and cumulative pollutant load ratio with respect to measured water quality indices and rainfall.

는 것으로 해석한다(Gupta and Saul, 1996).

조재현과 서형준(2007)은 부영양화 호수 주변구역의 강우 유출수를 2년간 조사하고, 초기세척효과를 분석하였다. SS는 초기세척효과가 뚜렷하지만 다른 인자들은 효과가 약하다고 보고하였다. 원철희 등(2009)은 산림과 밭 지역의 강우유출수의 초기세척효과를 분석하여 두 지역 모두 SS 항목에서는 현저한 초기세척이 일어나지 않는다고 하였다. 정성민 등(2009)은 한강 상류 구역의 농업지역에서 발생하는 비점오염 유출 특성과 초기세척효과를 분석하여, TP와 SS의 초기세척효과가 매우 크고, BOD와 COD 그리고 TN은 뚜렷한 초기세척효과가 나타나지는 않는다고 하였다. 이병수 등(2008)은 농촌지역에서의 비점오염 배출특성을 연구하여 농촌지역에서의 초기세척현상은 미미하거나 나타나지 않아, 강우시 농촌지역의 비점 오염특성은 초기세척현상의 접근방법보다는 유역특성, 강우특성, 유량특성 등의 인자에 대한 연구가 필요하다고 하였다. 비도시 지역의 연구결과 비도시 지역의 초기세척효과는 크지 않은 것으로 판단할 수 있다. 따라서 규사광산지역(산림)의 초기세척효과를 분석하여, 초기세척효과와 접근유무 그리고 영향인자를 찾는 것은 필요하다.

8개의 강우사상에 대한 유출-오염부하와 유출-강우의 누적곡선을 나타냈다(Fig. 4). 규사광산지역은 3차, 6차, 11차 그리고 13차 강우사상에서 1~3개 항목의 오염물질에 한하여 초기세척효과가 나타날 뿐 대부분의 강우사상과 오염물질에서 곡선의 기울기가 1에 근접한 값으로 뚜렷한 초기세척효과를 갖지는 못했다. 하지만 3차, 6차, 11차 그리고 13차 강우사상에서 SS는 다른 오염물질에 비하여 초기세척효과가 큰 것으로 나타났다. 또한 유출-SS 부하 누적곡선과 유출-강우 누적곡선의 패턴이 많은 강우사상에서 비슷한 경향을 나타냈다. 따라서 규사광산지역의 SS 부하 발생은 누적강우와 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 해석할 수 있다.

3.5. 유량가중평균농도(FWMC)

강우시 분석된 FWMC와 표준편차 그리고 변동계수를 산정하였다(Table 4). 강우사상별 FWMC는 SS 8,967.71 ~ 11.90 mg/L, COD_{Cr} 61.71 ~ 8.54 mg/L, COD_{Mn} 43.93 ~ 2.98 mg/L, BOD₅ 19.14 ~ 3.89 mg/L, TOC 11.10 ~ 2.28 mg/L, TN 15.59 ~ 0.30 mg/L, TP 2.693 ~ 0.089 mg/L의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 13회의 강우사상에 대한 FWMC는 SS 3,760.0 mg/L, COD_{Cr} 33.80 mg/L, COD_{Mn} 29.25 mg/L, BOD₅ 16.74 mg/L, TOC 8.26 mg/L, TN 2.90 mg/L, TP 0.736 mg/L로 산정되었다. TN의 변동계수가 155.5%로 가장 높았고, TP 92.8%, SS 89.9%의 순으로 나타났다. COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD₅ 그리고 TOC의 변동계수는 50.0% 이하로 낮게 나타났다. TN의 봄철 FWMC가 매우 높게 나타났고, 강우가 집중된 기간동안 낮은 농도를 보였기 때문에 변동계수가 매우 크게 산정된 것으로 판단된다. 강우가 집중된 기간동안 SS의 FWMC가 매우 크게 변화하였다. 이것은 강우시 규사광산지역에서 다른 오염 물질보다 SS를 저감시킬 수 있는 비점오염저감시설이 필요하다는 것을 의미한다.

4. 결론

규사광산지역에 대해 2008년 3월부터 12월까지 총 13회의 강우사상을 관측하였다. 규사광산지역의 비점오염 유출 특성 분석을 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

규사광산지역과 유사한 노천채굴 광산지역은 채석과 가공작업등으로 채석장 주변 환경의 변화가 심하기 때문에 강우량, 건기일수, 강우강도 등과 같은 기상인자들의 영향을 정확하게 파악하기 위해서는 장기간의 관측과 분석이 필요하다.

노천채굴과 규사의 가공작업으로 인하여 토지이용이 산

Table 4. FWMC of rainfall-runoff events

(Unit : mg/L)

Event	SS	COD _{Cr}	COD _{Mn}	BOD ₅	TOC	TN	TP
1	104.0	17.03	9.12	8.27	2.78	15.59	0.179
2	11.9	8.54	2.98	3.89	3.06	9.39	0.089
3	1,027.9	61.71	43.93	19.14	5.53	7.02	0.260
4	470.6	24.28	3.08	13.13	6.83	0.53	1.260
5	406.9	41.82	19.94	17.79	7.38	0.30	2.693
6	45.1	26.72	22.95	15.83	11.10	1.69	0.145
7	83.1	24.37	21.11	15.05	8.17	2.21	0.363
8	305.2	25.90	21.84	13.46	8.03	2.19	0.550
9	3,273.5	29.90	20.48	13.94	7.84	4.40	0.309
10	8,967.7	34.22	24.71	16.61	7.45	0.55	0.847
11	263.3	30.82	22.07	15.49	9.79	1.42	0.372
12	810.1	29.63	22.69	18.67	9.50	2.18	0.401
13	1,782.1	20.52	14.70	10.11	7.14	7.26	0.543
All event	3,760.0	33.80	29.25	16.74	8.26	2.90	0.736
SD*	3,378.6	13.2	14.3	5.0	2.5	4.5	0.7
CV** (%)	89.9	39.1	48.8	30.0	30.3	155.5	92.8

* SD : Standard deviation

** CV : Coefficient of variation

림에서 나지로 변화되었기 때문에 다른 오염물질보다 SS 부하와 FWMC가 크게 나타났다. 13회의 강우사상에서 나타난 SS 부하는 1회 평균 1,377.04 kg/ha로 매우 높았으며, FWMC는 최대 8,967.71 mg/L로 나타났다. 9차와 10차 강우사상에서 발생한 SS 부하는 총 SS 부하의 90% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 연구지역과 유사한 지역에서는 SS를 중점적으로 관리할 필요가 있다. 또한 비점오염은 총량관리가 중요하기 때문에 작은 강우뿐만 아니라 큰 강우에 대비한 시설이 설계되고, 설치되어야 비점오염 저감 시설의 목적을 달성할 수 있을 것이다. 또한 기상조건에 따른 오염부하와 FWMC의 정확한 산정하기 위해서는 장기간의 모니터링을 통한 많은 자료의 수집이 동반되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 조사된 자료와 분석된 결과는 토지이용별 비점오염부하의 산정과 저감기술의 개발에 활용할 수 있으며, 수질오염총량제의 신뢰성을 향상시킬 것으로 판단된다.

사 사

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

참고문헌

- 김순오, 정영일, 조현구(2006). 삼산제일·삼봉 동광산 주변 수계의 중금속 오염도 평가. *한국광물학회지*, **19**(3), pp. 171-187.
- 김연태, 우남철, 윤혜은, 윤철호(2006). 울산광산 주변지역 수계에서 유기 및 무기 비소 중 분포. *자원환경지질*, **39**(6), pp. 689-697.
- 오재일, 심연식(2003). 국내 산성광산배수(AMD)의 수질 특성 분석. *대한토목학회논문집*, **23**(6B), pp. 587-596.
- 원철희, 최용훈, 서지연, 김기철, 신민환, 최종대(2009). 산림과 밭 지역 강우 유출수의 EMC 및 원단위 산정. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(4), pp. 615-623.
- 이병수, 정용준, 박무중, 길경익(2008). 경안천 유역 농촌지역의 비점오염원 배출 특성에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(2), pp. 169-173.
- 이현동, 안재환, 김운지, 배철호(2001). 토지이용별 강우시 비점오염 물질의 유출특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **17**(2), pp. 147-156.
- 이홍신, 이승환(2009). 국내 중소 도시지역 강우유출수의 유출특성. *대한환경공학회지*, **31**(3), pp. 193-202.
- 정구복, 이종식, 김원일, 류종수, 윤순강(2008). 삼보광산 하류 수계의 계절별 수질변화와 오염도 평가. *한국환경농학회지*, **27**(4), pp. 328-336.
- 정성민, 장창원, 김재구, 김범철(2009). 한강상류 고령지 농업지역에서의 강우시 비점오염 유출 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(1), pp. 102-111.
- 조규송(1971). 상동광산 폐수의 오염이 하천생물에 미치는 영향. *한국하천호수학회지*, **4**(1), pp. 21-26.
- 조재현, 서형준(2007). 부영양상태 호수유역의 강우유출수에 의한 초기세척효과 분석. *환경영향평가*, **16**(5), pp. 341-350.
- 지상우, 김선준, 고주인(2005). 한창탄광 광산배수의 수질 특성 변화와 처리시설 정화효율에 관한 연구. *한국지구시스템공학회지*, **42**(1), pp. 9-19.
- 최중대, 이찬만, 최예환(1999). 토지이용이 농업소유역의 수질에 미치는 영향. *한국수자원학회논문집*, **32**(4), pp. 501-510.
- 환경부(2001). *수질오염공정시험방법주해*, 환경부고시.
- APHA, AWWA, WEF (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th.
- Gupta, K. and Saul, A. J. (1996). Specific relationship for the first flush load in combined sewer systems. *Water Res.*, **30**(5), pp. 1244-1252.