

폐광산주변 토양의 환경영향해석을 위한 수학적 접근

김광태¹ · 강미아^{2*}

¹전북대학교 환경공학과, ²안동대학교 환경공학과

Mathematical Approach for Environmental Impact Analysis of Soils from Abandoned Mines

Kwang-Tae Kim¹ and Meea Kang^{2*}

¹Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University

²Department of Environmental Engineering, Andong National University

폐광산 인근의 토양과 광미에서 발생하는 오염원은 중금속과 강산성의 배수가 주요한 원인물질이다. 이러한 오염원들은 인근의 토양까지 오염이 확산되어 결국 사람에게 건강상 유해성을 나타낸다. 본 연구에서는 중금속 오염이 심각한 폐광산을 대상으로 이들의 관리를 최적화하기 위해 요구되는 중금속 오염수준예측을 위한 수학적 접근방법을 시도하였다. 이를 위해 폐광산으로부터의 거리와, pH 및 산화환원전위(ORP)의 경시변화를 조사하여 이들의 상관성을 방정식으로 도출하였다. 대상으로 한 폐광산에 따라 다소의 차이는 보였으나, 60일간의 실험기간동안 변화되는 pH와 ORP는 초기의 pH와 ORP를 기준으로 할 때, 변화율이 0.95~1.03의 범위로 나타났다. 이것은 초기의 pH와 ORP를 기초로 폐광산 인근의 토양에서 발생하는 중금속류의 용출정도를 예측하여 환경영향평가를 실시할 수 있음을 시사하며, 이러한 접근방법은 다른 폐광산에도 적용할 수 있으므로 제거 또는 제어 대상인 중금속류의 관리에 유용하게 사용될 것으로 기대한다.

주요어 : 폐광산, 산화환원전위, pH, 중금속, 토양오염

The main reason of the pollution caused by soils and tailings located at discussed mines is heavy metals and AMD(acid mine drainage). Human health is affected by these pollutants which are spreaded from the abandoned mines. In this study, we try a mathematical approach to predict the pollution level of heavy metals caused by the surrounding soils of abandoned mines. The new approach is established with the correlation between the distance and pH, ORP. The change of pH and ORP can be described by the rate of initial values to experimental values. We demonstrate a realistic possibility of the mathematical approach to assess an environmental impact from disused mines cause the rate range is 0.95 to 1.03 for 60 days. Therefore our proposed approach will be useful as a few promising method for the management of heavy metals in many mines.

Key words : abandoned mine, ORP(oxidation-reduction potential), pH, heavy metal, soil pollution

서 론

폐광산으로부터 배출되는 산성배수는 금속광산의 개발이 중단되었을 때 갱도와 채굴갱내에 산소의 유입과 물에 의한 광상의 산화로 pH 4이하의 산성을 띠게 된다. 이들 산성배수는 토양을 오염시키는 다양한 원인 중에서 중요한 역할을 하는 인자이며, 이들로부터 발생하는

오염현황은 호우시 토양의 이송에 의해서도 확산되는 경향이 있다. 폐광산을 중심으로 그 거리에 따라 존재하는 토양의 오염도 수준을 중금속 오염도로 조사 연구하는 사례가 많으나, 이들 중금속류의 오염도는 토양의 pH와 산화환원전위(ORP) 수준에 의해 토양 중의 중금속 거동이 변화한다는 사실은 이미 많은 연구에 의해 밝혀진 사실임에도 불구하고, 이들에 대한 국내연구는 미흡한

*Corresponding author: wdream@andong.ac.kr

현실이다. 한편, 기존의 연구조사에 따르면, 국내외에서 광산산성배수를 처리하기 위해 가장 많이 이용되는 기술로는 우분과 석회석을 활용한 SAPS(successive alkalinity producing drains)이었으며, 이 기술은 산성광산배수의 형성과 관련된 황화광물을 환원시켜 침전을 유도하고 석회석으로 pH를 향상시키는 방법으로써 주기적으로 기질물질을 교체한다면 우수한 자연처리기술로 활용될 것이라 보고되고 있다(정명채, 2004). 또한 날로 심각해지는 산성광산배수로부터의 위해성을 저감하기 위해 여러 연구자들에 의해 지속적인 처리기술이 개발되고 있다(Eger *et al.*, 1994; Filippek *et al.*, 2003; Fiset *et al.*, 2003; Kevin *et al.*, 2005). 그러나 이러한 기술의 사용에 있어서 처리효율 개선정도를 예측하거나 경제성 등을 고려할 때 합리적이고 과학적인 접근이 부족한 경향이 있다. 오늘날 국내에서는 폐광산에 대한 적절한 조치를 강구하고 있으며, 한편으로는 실행하고 있으나 아직까지도 방치되어 있는 경우가 많고 이로 인해 중금속을 주로 하는 토양오염 및 지하수의 오염으로 인해 해당지역주민들의 불안은 매우 고조되어 있는 실정이다. 토양 내의 중금속농도는 단순한 토양 오염도를 나타내는 것으로 토양 내 또는 수중으로의 이동성, 용해성 및 용출가능성을 예측할 수 있는 자료로 사용하기에는 부적합하며, 총량이 아닌 중금속의 존재형태를 고려한 위험도 지수를 제시하는 연구도 발표되고 있다(김종욱 등, 1999; M. Kang *et al.*, 2000; Y. Sato *et al.*, 2002). 본 연구에서는 전라남북도지역에서 중금속 오염이 심각한 폐광산 2개소를 주 대상으로 하고 다른 폐광산 2개소를 초기자료의 구축에 이용하였다. 이들 광산인근의 토양 및 광미를 이용하여 용출시험을 실시하고, 이들로부터 발생하는 오염도의 확산정도를 거리에 따라 평가할 수 있는 수학적 접근을 시도하고자 한다. 본 연구 결과를 바탕으로 이들 폐광산 인근지역의 안전도를 파악할 수 있으며, 나아가 다른 폐광산지역에서 관리기술을 접목하는 데 있어서도 이용할 수 있는 과학적 기초자료를 제공하여 위해성 제어를 위한 합리적 기술개발에 기여하고자 한다.

시료수집 및 실험방법

시료수집

전라남북도에 소재하고 있는 오염도 조사 대상인 광산A와 B를 대상으로 하여, 광산A에서는 광산으로부터 20 m, 450 m, 950 m 및 1,800 m 거리 지점의 4개소에서, 광산B에서는 20 m, 180 m, 300 m 및 2,700 m 거리 지점

의 4개소에서 토양 및 광미를 채취하였다. 채취한 시료를 용출시험 및 토양오염도 조사에 이용하였다. 한편 다른 2개의 광산C와 광산D(광산C-4개지점, 광산D-3개지점)에 대해서는 초기의 용출자료를 이용하였다.

물리적특성실험

용출실험을 위해 메시로 부드럽게 체질한 다음, 각 시료당 1,000 g을 용출칼럼(직경 10 cm, 높이 100 cm)에 주입하고 증류수를 주입하였으며, 토양에서 발생하는 환경영향의 해석을 위한 오염인자로 pH와 ORP(HI 991003, U.S.A.)를 측정하였다. 사용한 용출칼럼은 기존의 연구(강미아, 2007, 강미아 등, 2007)에서 사용한 칼럼과 동일하다. 실험 및 자료해석은 광산A와 광산B를 대상으로 하여 8개 지점에 대해 60일간 pH와 ORP를 지속적으로 측정한 자료를 이용하여 경시변화로 해석하였다.

결과 및 고찰

광산주변 토양의 오염수준

광산주변 토양의 오염수준은 중금속의 오염도 수준으로 평가할 수 있으므로 광산A시료의 분석을 토양오염공정시험방법에 따라 수행하였다. 결과는 Table 1에 나타낸 바와 같다. 분석한 중금속은 Cu, Hg, CN, Pb, Ni, Cd, As, Zn, Mn 및 Fe 등 9개 항목이며 폐광산으로부터의 거리에 따라 자료를 정리하였다. 광산A와 광산B의 토양 및 광미의 오염수준분석결과를 Table 1(a)와 Table 1(b)에 각각 나타내었다. 광산A의 경우, Cu, Hg은 광산A에서 가장 가까운 지점인 20 m 거리에서 수집한 시료에서 각각 80.72 mg/kg과 52.97 mg/kg으로 검출되어 이들 중금속으로 오염이 큰 것을 알 수 있으며, 광산A로부터

Table 1(a). Soil pollution level of mine A.

Pollutants (mg/kg)	Distance (m)			
	20	450	950	1,800
Cu	80.72	2.100	2.405	4.279
Hg	52.97	0.044	0.031	0.879
CN	N.D.	0.220	N.D.	N.D.
Pb	42.32	16.76	13.34	5.876
Ni	0.010	4.691	2.877	4.571
Cd	N.D.	0.086	0.085	0.198
As	122	396	228	43.6
Zn	112	119	52.8	78.0
Mn	139	815	315	410
Fe	7,009	8,876	6,879	9,449

Table 1(b). Soil pollution level of mine B.

Pollutants (mg/kg)	Distance (m)			
	20	180	300	2700*
Cu	13.88	34.99	16.86	15.23
Hg	5.190	54.96	1.042	1.395
CN	N.D.	N.D.	0.134	N.D.
Pb	5.140	3.640	8.858	5.638
Ni	N.D.	3.820	1.374	6.541
Cd	N.D.	N.D.	0.055	0.056
As	N.D.	N.D.	0.606	0.740
Zn	35.6	97.9	18.5	32.1
Mn	10.9	185	13.3	180
Fe	21,997	14,303	17,099	19,423

※ *: tailings

450 m 이후에는 그 농도가 매우 낮아져 Cu와 Hg의 이동은 우려하지 않아도 될 것으로 판단된다. 그러나 Pb와 As는 광산A로부터의 거리가 20 m, 450 m, 950 m 및 1,800 m 로 멀어지는 경우에도 Cu와 Hg에 비해 현저히 높은 수준으로 검출되므로 광산A로부터 발생하는 Pb와 As에 대한 오염은 광산A로부터 다소 멀리 있는 지점의 토양까지 영향을 미치는 것으로 평가할 수 있다. 한편 광산B의 경우에는 Cu와 Hg에 의한 오염이 광산B에서 20 m 지점의 토양보다 180 m 지점의 토양에서 더 심각함을 알 수 있으며, 이후 Cu는 거의 50%의 수준까지만 낮아지는데 반해 Hg은 거의 1.5 mg/kg 이하의 수준으로까지 낮게 검출되는 것으로 보아 Cu에 의한 오염이 심각한 광산임을 알 수 있다. Pb은 거리에 따른 오

염도 수준을 이해하기에는 어려운 검출수준을 보였으며, As는 광미에서 가장 높게 검출되는 특성을 나타내었다.

광산주변 토양의 물리적특성

광산주변의 토양특성을 광산에서부터의 거리에 따라 정리하여 Table 2에 나타내었다. 광산에 따라 pH와 ORP의 수준은 차이를 나타내었으나, 각각의 광산주변의 토양은 폐광에 가까울수록 산성을 띠었다. 광산A에서는 20 m 지점에서의 토양시료에서 pH 4.66, 광산B에서는 300 m 지점에서 pH 3.85, 광산C에서는 광미에서 pH 4.77, 광산D에서는 50m 지점에서 pH 4.68로 모두 산성을 나타내었다. 초기 ORP는 초기의 pH에 영향을 받아 pH가 낮을수록 산화상태를 나타내는 경향을 보였다. 일부연구자들은 다른 pH영역에서의 횡적 ORP를 비교하기 위해 pH 1단위를 60 mV의 ORP로 환산하여 보려는 노력을 하고 있지만, 본 연구에서는 이를 사용하지 않고, 측정된 값들만 비교하였다. Fig. 1에는 초기 pH와 ORP에 미치는 거리의 영향을 나타내었으며, Fig. 2에는 pH와 ORP와의 상관성을 나타내었다. 4개의 다른 폐광산에서 채취한 토양으로부터 얻은 최초의 용출액에서 측정된 거리와 pH와의 관계는 상관계수(r=0.8)가 높아 거리에 따른 토양의 산성수준을 평가할 수 있다. 한편, 토양 중의 중금속 거동에 직접적인 영향을 미치는 pH와 ORP의 상관계수도 0.8로 높게 나타났다.

pH와 ORP의 경시변화

광산A 및 광산B에서 거리별로 채취한 토양시료의 용

Table 2. Initial pH and ORP caused by soils depend on distances.

Distance (m)	Items	A		B		C		D	
		pH	ORP(mV)	pH	ORP(mV)	pH	ORP(mV)	pH	ORP(mV)
0*						4.77	464		
20		4.66	396	3.95	473				
50								4.68	466
180				5.18	431				
300				3.85	453				
400								5.21	441
450		5.63	297						
500						5.41	404		
800								5.29	434
950		6.02	324						
1000						5.23	452		
1800		6.12	314						
2000						5.55	426		
2700*				6.20	338				

※ *: tailings

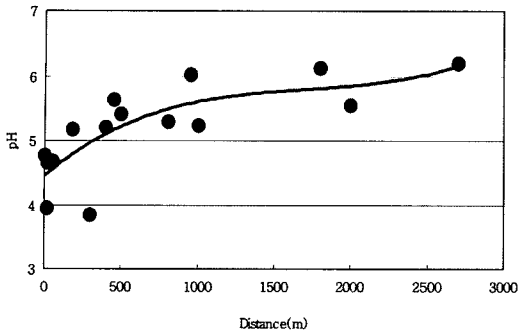


Fig. 1. Relationship between distance and pH.

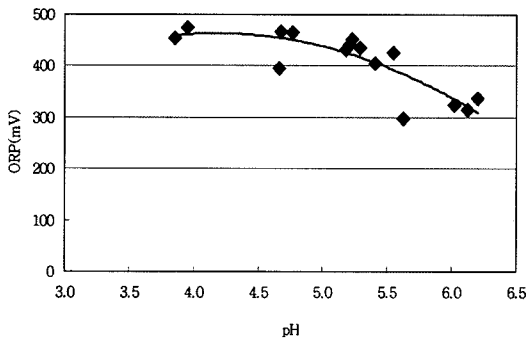


Fig. 2. Relationship between pH and ORP.

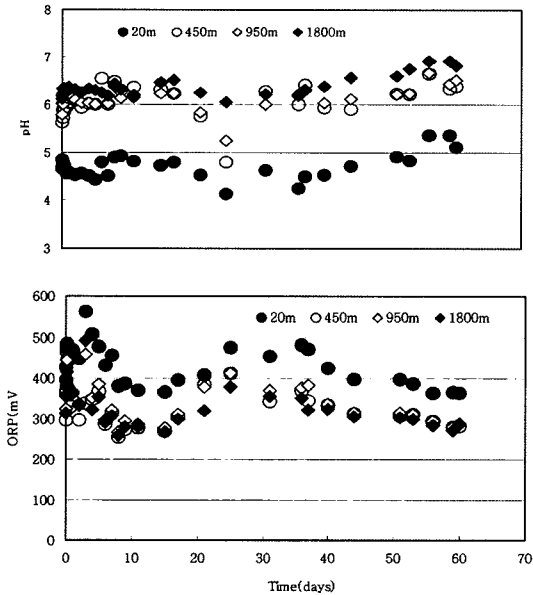


Fig. 3. Changes of pH and ORP with soils from mine A depend on times.

출액을 대상으로 pH와 ORP의 경시변화를 조사하여 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 나타내었다. 광산A에서 채취한

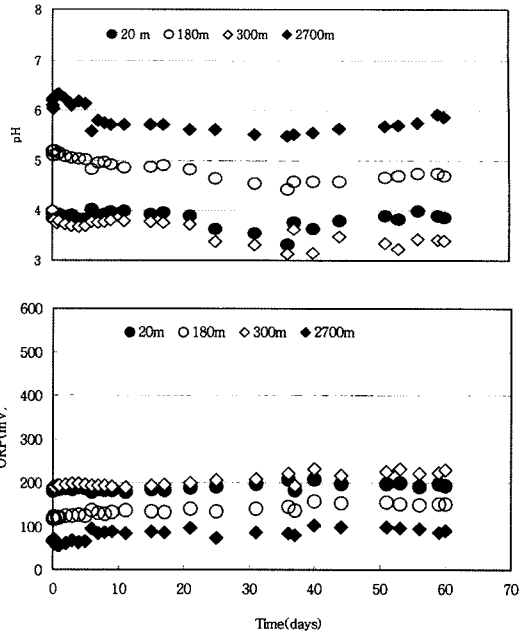


Fig. 4. Changes of pH and ORP with soils from mine B depend on times.

시료에 의한 ORP의 변화는 모든 4개 지점에서 1일(24시간이내) 동안에 크게 나타났으며, 20 m 지점에서는 초기 396 mV에서 470 mV로, 450 m 지점에서는 초기 297 mV에서 346 mV로, 950 m 지점에서는 초기 324 mV에서 366 mV로, 1,800 m 지점에서는 초기 314 mV에서 362 mV로 각각 증가하였다. 한편 광산B에서는 그림에서 보는 바와 같이 변화의 폭은 그리 크지 않음을 알 수 있다. 60일간의 실험기간 동안에 측정된 pH와 ORP의 평균값을 초기 측정값과의 비율로 조사하여 향후 광미 및 오염된 토양의 효율적 관리를 위한 자료로 제시하고자 Table 3과 같이 나타내었다. pH의 변화율은 광산A는 1.04로 다소 상승하였으며, 광산B는 0.95로 다소 감소하였다. 그러나 전체적인 변화는 초기의 pH 영역에서 그리 큰 변화율을 나타내지 않음을 알 수 있다. 한편 ORP의 변화율은 광산A에서 1.07, 광산B에서 1.13으로 두 지점 모두 다소 상승하는 결과를 나타내었는데, 이것은 공기 중의 산소 등과 같은 환경에 의한 것으로 판단된다.

광산특성에 따른 수식이용의 적합성

대상으로 한 광산A와 광산B의 각각 4개 지점에서 채취한 토양시료에서 발생하는 pH로부터 산성배수의 영향을 예측할 수 있으며, 토양으로부터 용출되는 중금속

Table 3. Rate of change on pH and ORP.

Mine	A								B							
	pH				ORP(mV)				pH				ORP(mV)			
Distance (m)	20	450	950	1800	20	450	950	1800	20	180	300	2700	20	180	300	2700
Initial Value	4.66	5.63	6.02	6.12	396	297	324	314	3.95	5.18	3.85	6.2	183	118	189	63
Average Value	4.71	6.06	6.13	6.38	431	328	342	328	3.86	4.87	3.62	5.87	189	135	203	80
Rate of Individual Change	1.01	1.08	1.02	1.04	1.09	1.10	1.06	1.04	0.98	0.94	0.94	0.95	1.03	1.14	1.07	1.27
Rate of Total Change	1.04				1.07				0.95				1.13			

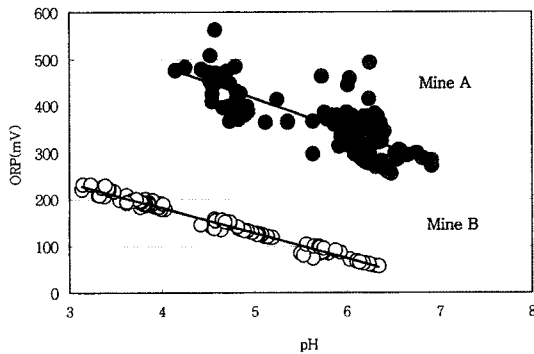


Fig. 5. Relationship between pH and ORP depend on mines.

의 관리를 위해 ORP와의 상관성을 Fig. 5에 나타내었으며, 이들 관계를 수식으로 나타내었다. 광산특성에 따라 pH는 ORP와의 상관성에서 다소 차이를 나타내기는 하였지만, 광산A에서 상관계수는 $r=0.78$, 광산B에서 상관계수는 $r=0.99$ 로 나타났으므로 이들 상관계수는 매우 양호한 수준임을 알 수 있다. 특히 광산B는 pH와 ORP의 상관도도가 $r^2=0.98$ 수준으로 조사되어 pH가 낮아수록 ORP가 높아지는 이론적 물리적 특성을 그대로 반영하고 있다. 또한 구해진 일차방정식은 다음과 같다.

광산A의 경우

$$y = -70.819 x + 769 \quad (r=0.78)$$

광산B의 경우

$$y = -54.184 x + 398 \quad (r=0.99)$$

여기서 $y = \text{ORP(mV)}$, $x = \text{pH}$

결 론

국가에서 실시하고 있는 전국 광산오염도 조사에서 얻어진 오염현황결과를 기초로, 보다 과학적으로 폐광산을 관리하기 위해서는 개별 광산 특성 뿐만 아니라 오염물질에 따라 광산특성을 구분하여 그룹화 하는 것이 필요하다. 또한 본 연구에서 얻은 결과를 토대로 기초

사된 자료들을 이용하여 수학적 해석을 통해 오염도 예측이 가능할 것으로 사료된다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 폐광산A는 B의 주변 토양으로부터 As, Pb 및 Pb, Cu 등의 중금속이 각각 심각한 수준으로 검출되었으며, 특히 광미에 의한 중금속오염은 광산으로부터의 이격거리보다 우선하는 주요오염인자로 조사되었다.

2) 폐광산으로부터의 거리에 따른 pH의 변화를 수식화하는 것은 일반화하기 어렵다. 그러나 개별 광산에 대해서는 pH와 ORP의 관계가 매우 양호하게 나타나므로 이를 이용하여 관계방정식을 구축할 수 있고, 구축된 방정식을 이용하면 폐광산 인근토양으로부터 발생하는 중금속 용출정도를 예측할 수 있다.

3) 60일간 연구기간동안에 얻은 pH와 ORP의 경시변화결과는 폐광산에 따라 다소 차이는 있으나, 그 변화율이 0.95~1.13의 수준으로 이들의 변화폭이 그리 크지 않음을 증명한다.

따라서 초기의 중금속 농도를 조사하여 폐광산 인근에서 향후 발생하는 중금속 오염도 확산 등에 본 연구에서 사용한 방법을 이용하면, 경제적이고 신속한 오염도 확산예측이 가능하여 주민건강예방에 적극적인 대처 방안을 마련할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

이 논문은 2007학년도 안동대학교 학술연구지원사업에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

강미아, 2007, 산성광산배수로 인한 환경오염도 조사, 대한지질공학회지, 17(1), pp. 143-150.
 강미아, 김광태, 2007, 토양 및 광미의 용출실험을 이용한 폐광산오염수준의 모니터링, 대한지질공학회지, 17(3), pp. 419-424.
 김중욱, 문희수, 송윤구, 유장한, 1999, 구봉광산 일대 광

- 미, 하상퇴적물 및 주변토양에서의 중금속원소의 존재 형태, *자원환경지질*, 32(3), pp. 261-271.
- 정명채, 2004, Successive Alkalinity Producing System (SAPA)을 이용한 폐석탄광의 산 성광산배수 처리, *대한환경공학회지*, 26(11), pp. 1204-1210.
- Eger, P., Wagner, J., Kassa, Z. and Melchert, G., 1994, Metal removal in wetland treatment systems, *Proceedings of the International Land Reclamation and Mine Drainage Conference/Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*, Pittsburgh, PA, pp. 80-88.
- Filipek, L.H., Hatton, C., Gusek, J. and Tsukamoto, T., 2003, Passive treatment of acid rock drainage (ARD): state of the practice, *Proceedings of the Tenth International Conference of Tailings and Mine Waste*, Colorado, U.S.A., pp. 293-303.
- Fiset, J.F., Zinck, J.M. and Nkinamubanzi, P.C., 2003, Chemical stabilization of metal hydroxide sludge, *Proceeding of the X International Conference of Tailings and Mine Waste*, Vail, CO, U.S.A., AA Balkema, pp. 329-332.
- Kang M. A., Kawasaki Mutsuo, Tamada Synya, Kamei Tasuku and Magara Yasumoto, 2000, *Desalination*, 131(1-3), pp. 293-298.
- Kevena B. Hallberg, D. and Barrie Johnson, 2005, *Microbiology of a wetland ecosystem constructed to remediate mine drainage from a heavy metal mine,*

- Science of Total Environment* 338, pp. 53-66.
- Yuko Sato, Meea Kang, Tasuku Kamei, Yasumoto Magara, 2002, Performance of nanofiltration for arsenic removal, *Water Research* 36, pp. 3371-3377.

2008년 8월 19일 원고접수, 2008년 9월 16일 게재승인

김광태

전북대학교 환경공학과
전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14번지
TEL: 062-949-0710
FAX: 062-949-0702
e-mail: kshine@emc.or.kr

강미아

안동대학교 환경공학과
경북 안동시 송천동 388
TEL: 054-820-6267
FAX: 054-820-6267
e-mail: wdream@andong.ac.kr