

에서 열탈착하여 가스크로마토그래피 - 질량분석기(GC/MSD)로 분석하였다.

스타이렌은 200 ppm의 액상표준시료를 질소 1L(Tedlar Bag)에 50, 100, 200, 400ng을 취하여 대기 중 농도로 11.743, 23.485, 46.971, 93.941 ppb를 제조한 후 시료와 동일한 방법으로 분석하여 검량선을 작성하였다.

악취물질의 분석은 악취 공정시험방법¹³⁾을 사용하였으며, 김기현(2005)¹⁴⁾ 등의 방법을 참고하였다.

Table 3. Analysis instrument and condition of odorous compounds

Odor Substance	Instrument and analysis condition
Sulfur compounds	<ul style="list-style-type: none"> · 분석기기 : Air server, Markes TD, Agilent 6890N GC · 검출기 : PFPD · 표준물질 : Rigas 10ppmV · 저온농축 조건 Cold Trap : MARKES U-T8CUS(Quarts tube -Carbopack B/Silica gel) 농축 : -15℃, 탈착 : 250℃ 시료량 : 50 mL/분, 2~20분 · GC 분석조건 Column : SPB-TM1 sulfur, 30m, 0.32mm ID, 4um FT Oven Temp : 70℃/5분, 15℃/분, 150℃/1분 Detector : 공기1:10.6 mL/분, 수소:11.5 mL/분, 공기2:10 mL/분, 250℃
Aldehyde	<ul style="list-style-type: none"> · 분석기기 : Agilent 1100 HPLC · 검출기 : UV Detector · 표준물질 : Supelco 15 ppm as aldehyde · HPLC 분석조건 Column : Agilent Eclipse XDB C-18(4.6mm * 150mm) 이동상 : Water : ACN = 40 : 60, 1m L/분 시료주입량 : 20μl
VOCs substance	<ul style="list-style-type: none"> · 분석기기 : Air server, Markes TD, Agilent 6890N GC · 검출기 : Agilent 5975 MSD · 표준물질 (Styrene) : Supelco 200 ppm in methanol · 저온농축 조건 Cold Trap : MARKES U-T3ATX (Quarts tube - Tenax TA Carbopack B) 농축 : -0℃, 탈착 : 250℃ 시료량 : 50 mL/분, 2~20분 · GC 분석조건 Column : DB-5ms, 60m x 0.25mm, 0.25μm FT Column 유속 : 1.0 mL/min Oven 온도 : 50℃ (5분)→5℃/분, 150℃ (1분)→15℃/분→250℃ (3분) MS 온도 : Quad. 150℃, Ion source 230℃ Transfer line : 280℃ EI mode, 40~250amu

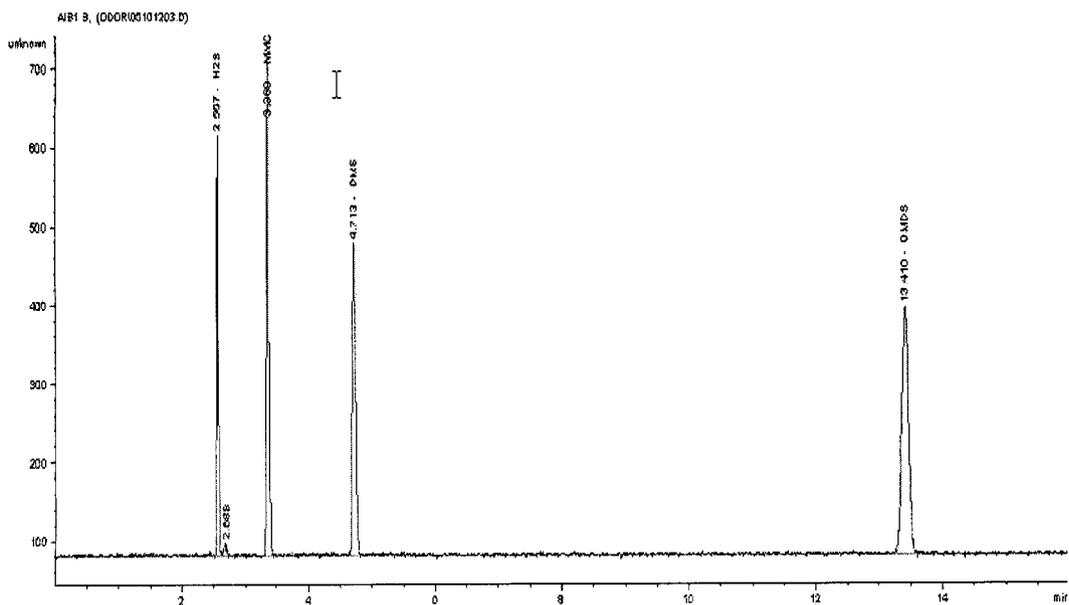


Fig. 9. Gas chromatogram of sulfur compounds by PFPD.

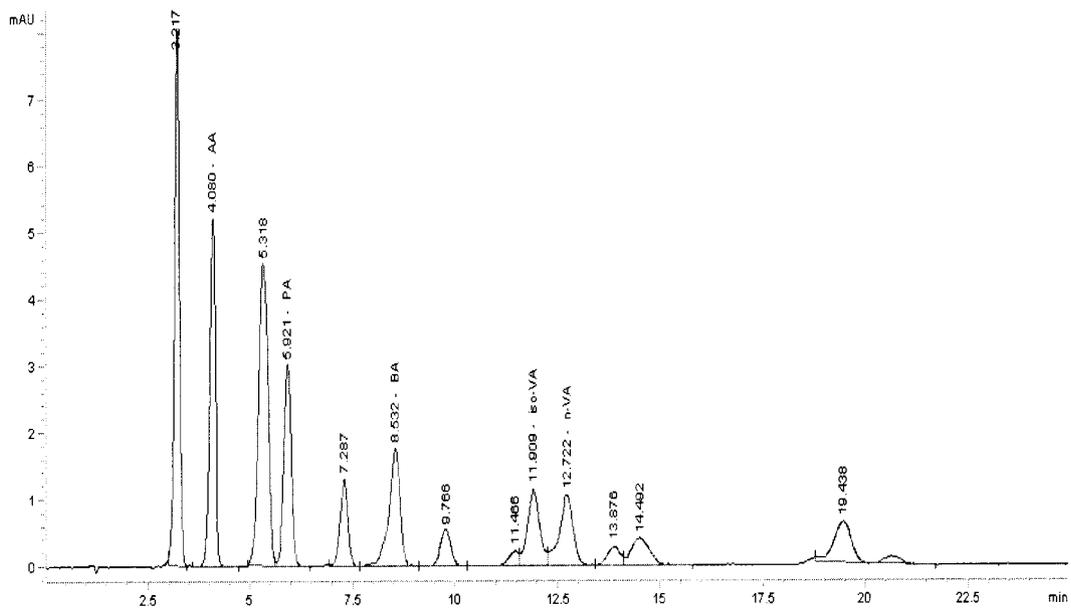


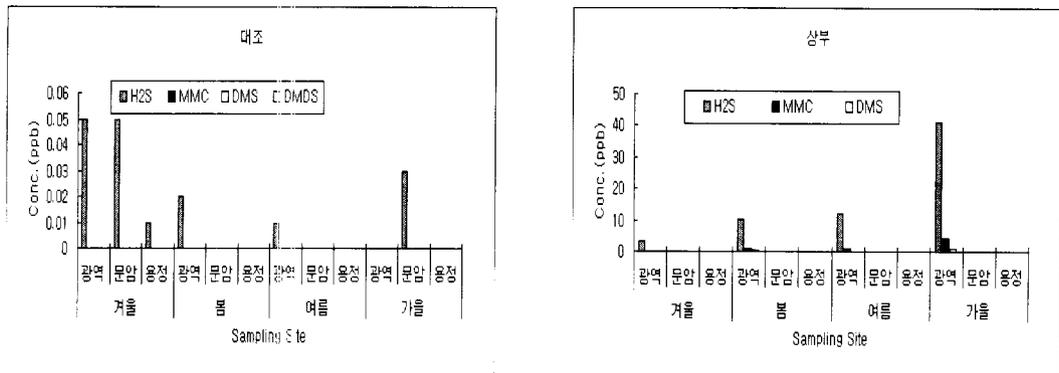
Fig. 10. HPLC chromatogram of aldehydes by DNPH derivative.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 매립장내 대기(상부, 사면, 대조)에서의 VOCs 및 악취물질 배출농도

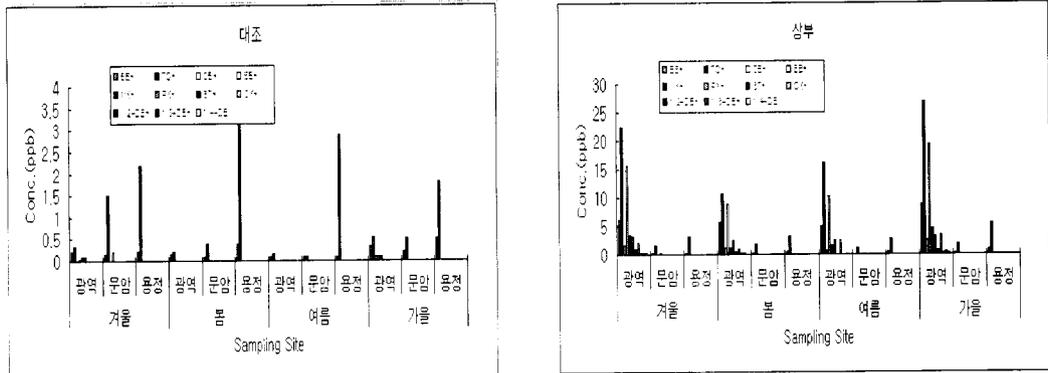
청주매립장과 문암, 용정매립장은 각 매립지역의 매립진행 및 매립완료 시점이 서로 상이하여 매립 후 시간경과에 따라 발생하는 여러 종류의 가스상 혼합물의 성상을 알아 볼 수 있는 좋은 연구장소이다.

상부의 분석결과는 Fig. 11~15와 Table 4, 5에 나타내었다. VOCs중 대표물질인 Toluene과 악취유발물질중 대표물질인 황화수소의 농도는 청주매립장 Toluene 19.0 ppb, 황화수소 16.60 ppb, 문암매립장 Toluene 1.6 ppb, 황화수소 0.04 ppb, 용정매립장 Toluene 3.65 ppb, 황화수소 0.00 ppb의 연간 평균농도를 보이고 있어 청주매립장이 문암과 용정매립장 보다 5배 이상 높은 가스 유출이 있는 것으로 조사 되었다. 이는 문암과 용정매립장은 매립가스 포집시설에 의해 가스 강제연소, 체육시설로의 용도 변경에 따라 최종복토 완료등으로 매립가스의 유출이 없는 반면 청주매립장은 소화 배출구에서 발생하는 미연소 배출가스, 매립장 표면에서 가스누출, 복토가 진행중인 폐기물 매립층 가스가 상부의 대기농도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.



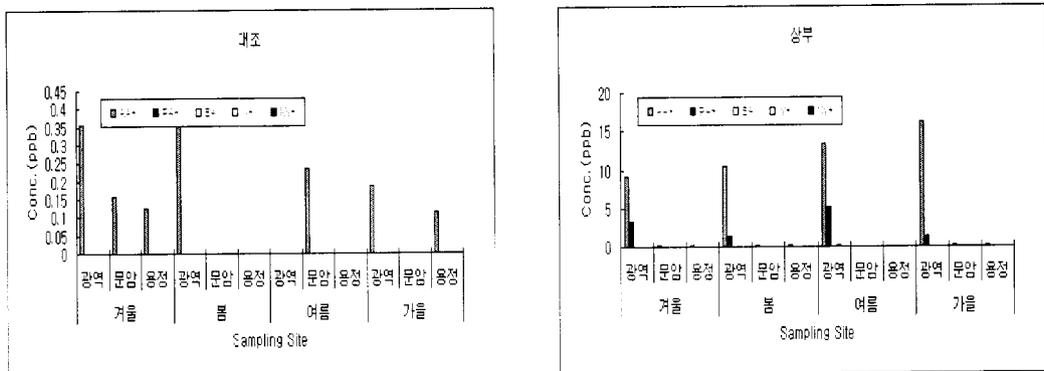
* H₂S : Hydrogensulfide, MMC : Methylmercaptan, DMS : Dimethylsulfide, DMDS : Dimethyldisulfide

Fig. 11. The concentration distribution of sulfur compounds for comparison and top areas.



* BE : Benzene, TO : Toluene, CB : Chlorobenzene, MX : m-xylene, PX : p-xylene, OX : o-xylene, ST : Styrene, 1,2-DB : 1,2-Dichlorobenzene, 1,3-DB : 1,3-Dichlorobenzene, 1,4-DB : 1,4-Dichlorobenzene

Fig. 12. The concentration distribution of VOCs for comparison and top areas.



* AA : Acetaldehyde, PA : Propionaldehyde, BA : Butyraldehyde, IV : iso-valeraldehyde, NV : normal-valeraldehyde,

Fig. 13. The concentration distribution of Aldehyde for comparison and top areas.

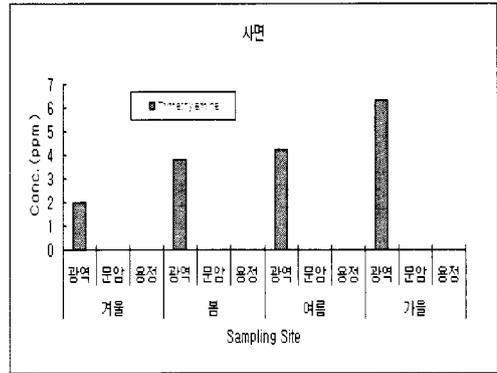
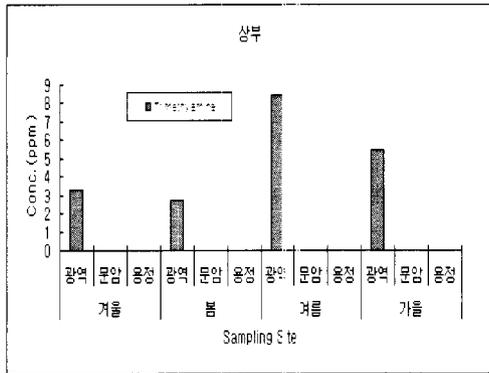


Fig. 14. The concentration distribution of Trimethylamine for top area and inclined plane.

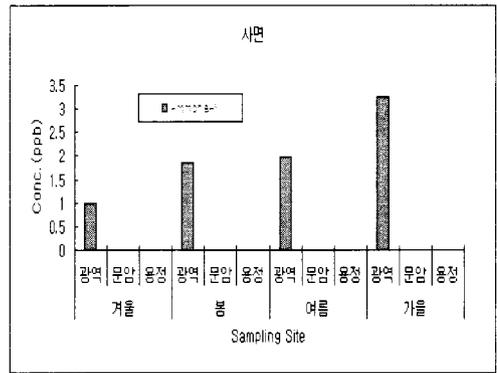
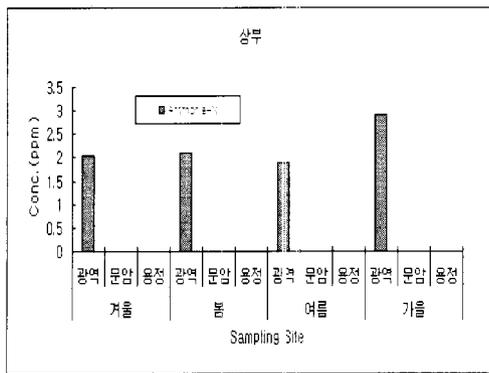


Fig. 15. The concentration distribution of Ammonia for top area and inclined plane.

사면의 분석결과는 Fig. 16~18와 Table 4, 5에서 보는 바와 같이 용정과 문암매립장은 VOCs와 악취유발물질이 극히 미미한 정도로 검출되고 그 농도가 연중 일정한 반면 청주매립장은 시료채취 시기가 하반기로 진행될수록 모두 증가하고 있는 추세를 보이고 있다. 이는 청주매립장 1월 시료채취시 없었던 사면의 균열(Fig. 19)현상이 발생하여 채취시기가 하반기로 갈수록 매립가스의 농도가 증가하는 원인으로 볼 수 있다. 이에 대비하여 7월중에는 사면 배출구에 강제흡인 포집을 추가하고 Fig. 20에서 보는 바와 같이 10월중에는 비닐로

덮어 악취제어를 하고 있다. 그러나 그 균열 범위가 방대하여 근본적인 대책이 되지 못하고 비닐 내부의 가스를 포집후 분석을 한 결과 Toluene 1,105.8 ppb, 황화수소 5,434.7 ppb의 농도로 용정매립장 배출구에 근접하는 농도가 측정됨에 따라 현재 악취발생의 주 요인으로 판단되어 균열을 따라 가스 포집공을 매설 후 강제 흡인 소각하는 방식등 대책이 시급한 것으로 사료된다.

매립장 사면의 균열 확장 이외에 매립시 Fig. 21과 같이 현재의 9단 매립 진행방향이 균열이 존재하는 방향으로 매립이 진행됨에 따라 균열이 있는 사면 쪽으로 매립가스의 편중현상 발생, 우수 침투수로 인한 침출수 고임 등으로 이론적 고찰에서 본 바와 같이 침출수에 의한 매립가스의 배출량, 가스농도 증가도 예상이 가능하다.

Table 4. The concentrations of VOCs

(unit : ppb)

Landfill ID		BE	TO	CB	EB	O,M,P-X*	ST
CJ	대조지역	0.1~0.3 (0.20)	0.2~0.6 (0.31)	0.0~0.1 (0.03)	0.00~0.1 (0.03)	0.0~0.2 (0.08)	0.0~0.0 (0.00)
	상부	4.9~8.9 (6.38)	10.6~26.9 (19.00)	0.7~2.5 (1.45)	8.9~19.4 (13.5)	4.6~11. (7.73)	0.1~0.8 (0.50)
	사면	1.5~15.2 (5.65)	5.6~29.3 (13.30)	0.1~3.2 (1.42)	4.1~16.9 (9.33)	2.8~9.2 (6.13)	0.2~1.0 (0.62)
	배출구	60.4~784.3 (431.83)	499.5~6678.3 (3588.14)	2.3~127.5 (47.80)	85.4~1980.4 (820.67)	73.21~1966.3 (799.57)	1.30~88.1 (15.64)
MA	대조지역	0.1~0.2 (0.13)	0.1~1.5 (0.62)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.2 (0.05)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)
	상부	0.1~0.2 (0.15)	1.2~1.9 (1.60)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.2 (0.05)	0.00~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)
	사면	0.1~0.4 (0.16)	0.3~1.0 (0.75)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.2 (0.08)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)
	배출구	34.0~410.2 (377.36)	2300.1~3400.2 (2825.34)	12.0~29.0 (19.01)	300.3~670.4 (518.75)	355.0~599.0 (482.25)	81.0~200.0 (127.75)
YJ	대조지역	0.1~0.5 (0.30)	1.8~3.5 (2.60)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)
	상부	0.3~0.9 (0.55)	2.7~5.5 (3.65)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)
	사면	0.2~1.2 (0.70)	1.0~2.5 (1.93)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.00 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)
	배출구	195.2~327.6 (268.35)	1420.5~2100.8 (1869.95)	6.70~16.7 (12.45)	360.0~2640.2 (990.29)	256.0~451.0 (349.37)	63.4~110.3 (82.23)

* O,M,P-X : o-xylene + m-xylene + p-xylene

Table 5. The concentrations of odorous compounds

(unit : ppb)

Landfill ID		Sulfur	Aldehyde	Trimethylamine	Amonia(ppm)
CJ	대조지역	0.0~0.1 (0.02)	0.0~0.4 (0.24)	0.0~2.6 (1.21)	0.0~0.0 (0.00)
	상부	3.1~41.2 (16.60)	9.1~16.2 (12.20)	2.8~8.5 (4.99)	1.9~2.9 (2.24)
	사면	1.4~100.2 (36.73)	4.2~32.4 (18.31)	2.0~6.3 (4.08)	1.0~3.3 (2.02)
	배출구	51.6~425689.1 (202974.78)	9.2~105.3 (57.10)	16.7~77.8 (45.05)	2.3~9.8 (6.55)
MA	대조지역	0.0~0.1 (0.02)	0.0~0.2 (0.10)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)
	상부	0.0~0.1 (0.04)	0.0~0.2 (0.15)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)
	사면	0.0~0.1 (0.03)	0.1~0.5 (0.30)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)
	배출구	9129.8~15527.1 (11425.54)	10.4~25.4 (17.57)	2.3~4.0 (3.03)	6.2~9.2 (7.31)
YJ	대조지역	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.1 (0.06)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)
	상부	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.2 (0.10)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)
	사면	0.0~0.1 (0.02)	0.2~0.3 (0.24)	0.0~0.0 (0.00)	0.0~0.0 (0.00)
	배출구	920.1~19853.4 (8074.50)	11.7~15.2 (13.22)	1.8~3.8 (2.58)	2.3~5.2 (3.23)

* Sulfur : Hydrogensulfide + Methylmercaptan + Dimethylsulfide + Dimethyldisulfide
 Aldehyde : acetaldehyde + Propionaldehyde + Butyraldehyde + iso-valeraldehyde + normal-valeraldehyde

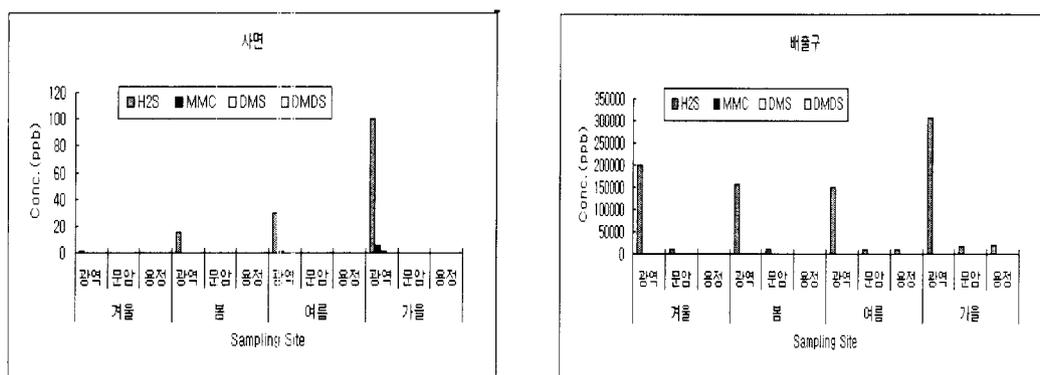


Fig. 16. The concentration distribution of sulfur compounds for inclined plane and ventpipe.

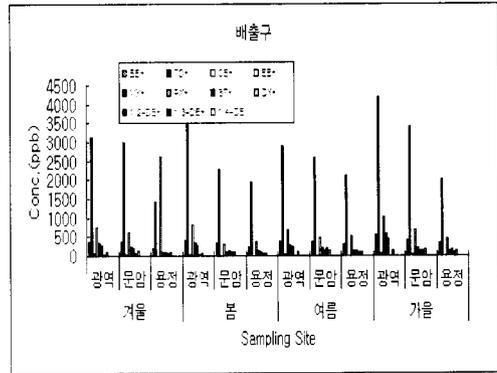
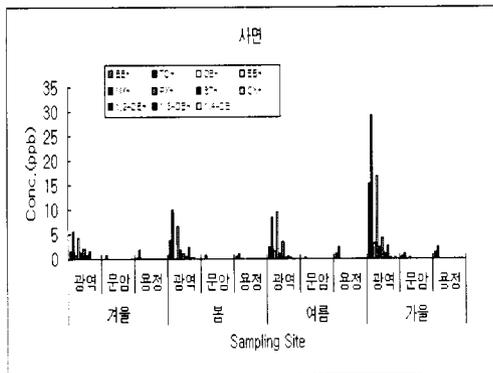


Fig. 17. The concentration distribution of VOCs for inclined plane and ventpipe.

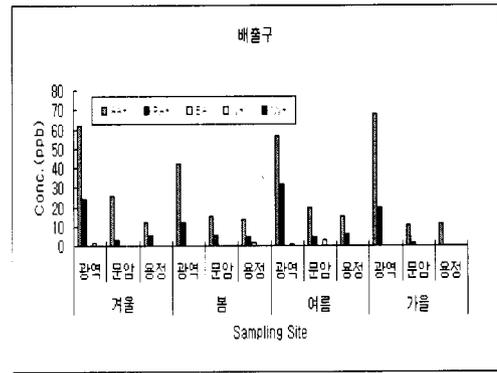
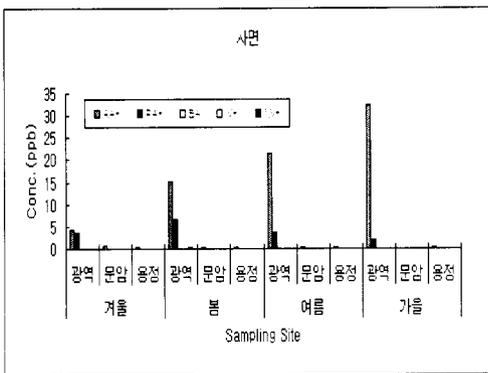


Fig. 18. The concentration distribution of Aldehyde for inclined plane and ventpipe.

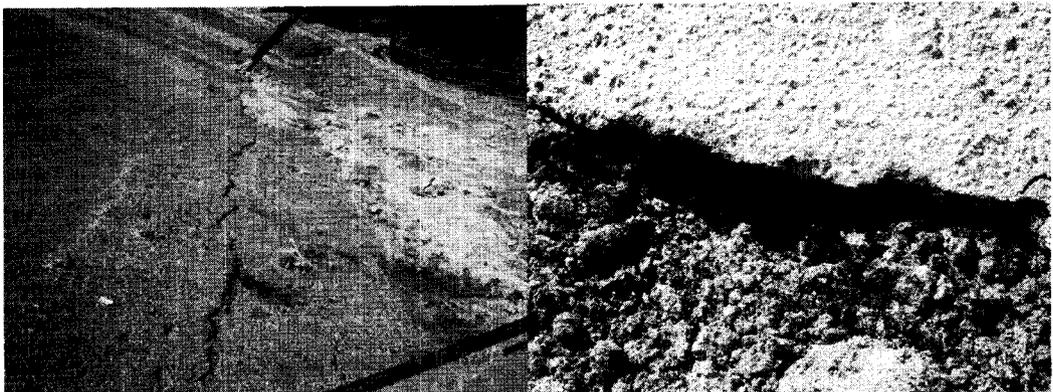


Fig. 19. Crack of inclined plane(April).

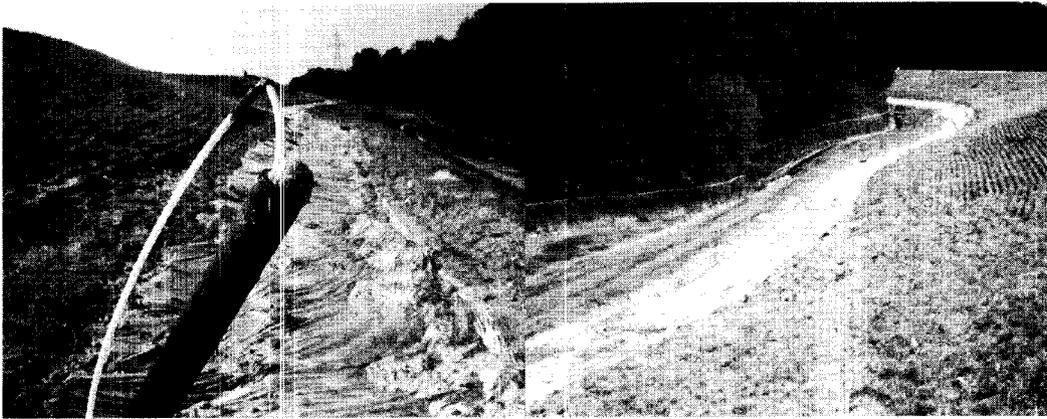
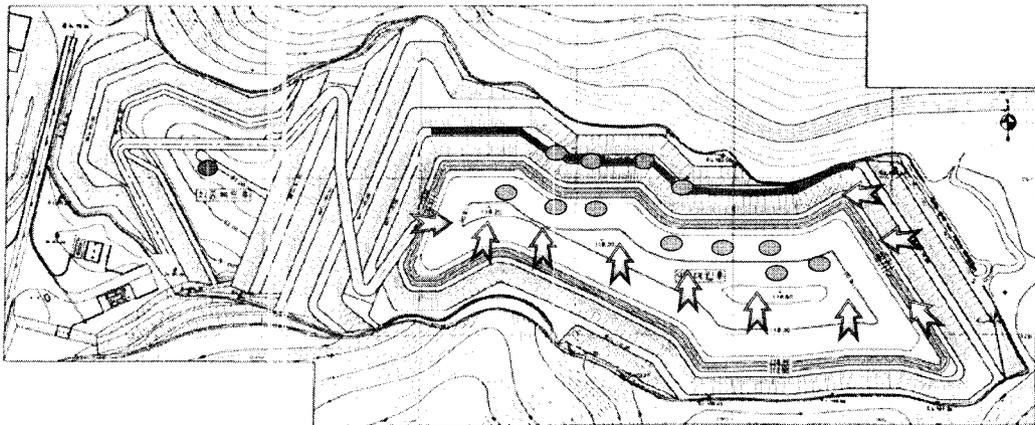


Fig. 20. Crack of inclined plane(October).



○ : Ventpipes, — : inclined crack, ⇨ : landfill point

Fig. 21. Ventpipes, inclined crack and landfill process of Cheongju landfill site.

대조지역의 분석결과는 Fig. 11~13와 Table 4, 5에서 보는 바와 같이 청주 매립장에서 아주 미미한 농도를 보이고 용정과 문암 매립장에서는 자동차 운행 및 생활환경에서 배출된다고 판단되는 BTEX계통의 VOCs가 일부 검출되는 것으로 보아 체육용지로 개발해도 VOCs 및 악취유발물질로 인한 심미적, 건강상 유해요인이 잔존하지 않는 것으로 사료된다.

2. 매립장 가스 배출구에서의 VOCs 및 악취물질 배출농도 측정

본 연구에서는 매립장 부지 내부에서의 악취물질을 측정과 동시에 각 매립장에 설치되어 있는 가스 배출공에서의 배출농도도 같은 기간에 걸쳐 측정하였다. 현재 매립이 진행중인 청주매립장은 앞에서 언급한 것과 같이 배출구의 위치 및 개수가 매우 유동적이므로 배출공에서 배출되는 전체유량을 측정하기는 불가능하여 사면 배출구, 상부 배출구, 하부배출구 및 발전소 유입부 측정 결과를 계절별로 요약하여 Fig. 16~18, 22 및 Table 4, 5에 나타내었다.

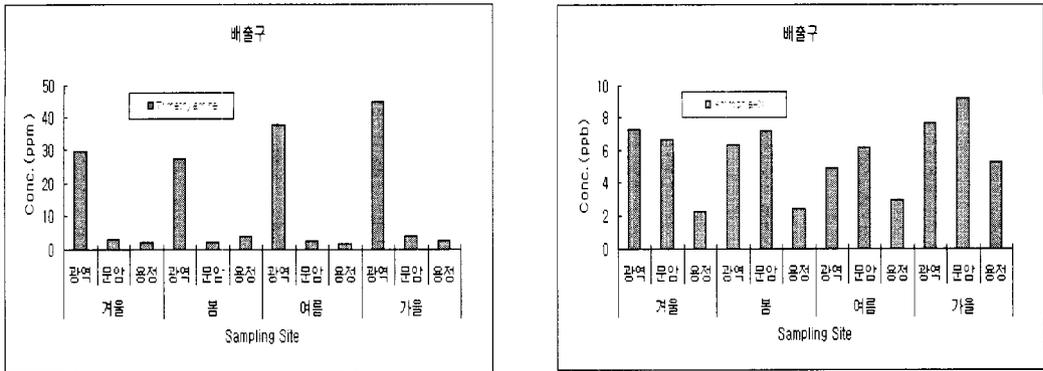


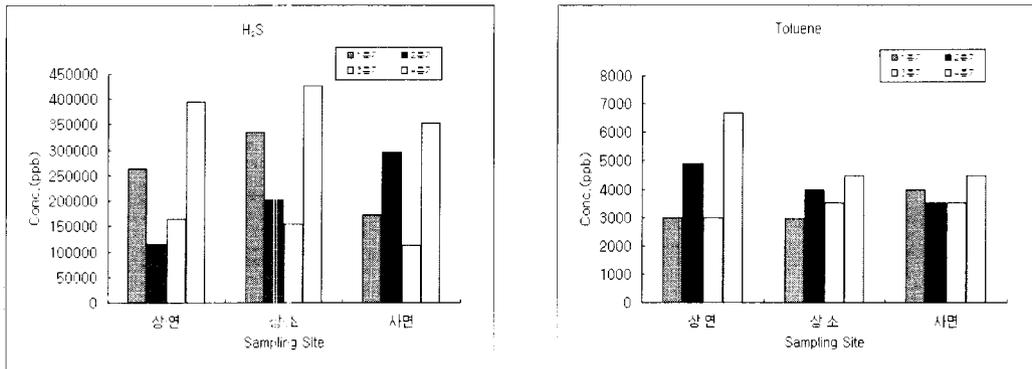
Fig. 22. The concentration distribution of Trimethylamine and Ammonia for ventpipe.

가스 배출구는 매립장내 대기 시료와 같은 방법으로 시료를 분기별로 채취하여 측정결과는 암모니아만 ppm 단위로 표기하고 나머지는 ppb 단위로 나타내었다.

Fig. 16~18, 22 및 Table 4, 5에 나타난 바와 같이 매립지 가스 배출구에서 악취유발물질, VOCs 농도 및 검출빈도는 매립시점이 오래될 수록 감소하는 뚜렷한 경향을 볼 수 있다. 현재 매립이 진행중인 청주매립장의 시료들에서의 VOCs 검출량은 그 종류와 양에 있어서 문암, 용정매립장과는 비교되지 않을 정도로 다량 나타났다. 문암과 용정매립장은 악취유발물질 및 VOCs 농도는 적었으나 환경학적 중요성이 높은 BTEX계통은 꾸준히 배출되고 있음을 알

수 있다. 또한 예상과는 달리 매립 종료 후 12년이 경과한 용정매립장에서도 가스 배출공에서의 농도는 5년이 경과한 문암매립장과 여전히 유사한 농도로 배출되고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유는 매립이 종료된 지역에서의 지표면은 토양복원 등을 통해 안정화되고 있으나 지하 깊은 곳에 설치된 배관을 통해 가스 배출구로 방출되는 VOCs는 12년이 경과하더라도 발생함을 알 수 있었다.

청주매립장의 경우 연소 배출구와 소화 배출구의 측정결과 Fig. 23~25와 같이 거의 유사한 농도임을 알 수 있으며 연간 평균농도를 상부에서와 같이 VOCs 중 Toluene, 악취유발물질 중 황화수소로 나타낼 경우 Toluene은 연소 배출구는 4,392.5 ppb, 소화 배출구는 3,740.5 ppb, 사면 배출구는 3,883.2ppb, 황화수소는 연소 배출구는 234,721.5 ppb, 소화 배출구는 279,265.6 ppb, 사면 배출구는 233,785.9 ppb를 나타내고 있어 매립장 균열과 동일하게 매립장 악취발생원으로 추측할 수 있어 자동점화장치의 부착으로 연속적인 연소가 될 수 있도록 하여야겠다.



* 상·연 : 상부 연소 배출구, 상·소 : 상부 소화 배출구, 사면 : 사면 배출구

Fig. 23. The concentration distribution of H₂S and Toluene in Cheongju landfill site.

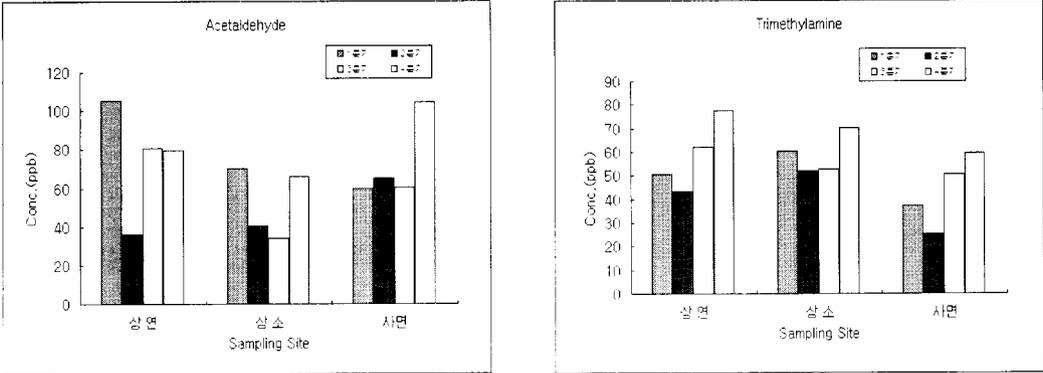


Fig. 24. The concentration distribution of Acetaldehyde and Trimethylamine in Cheongju landfill site.

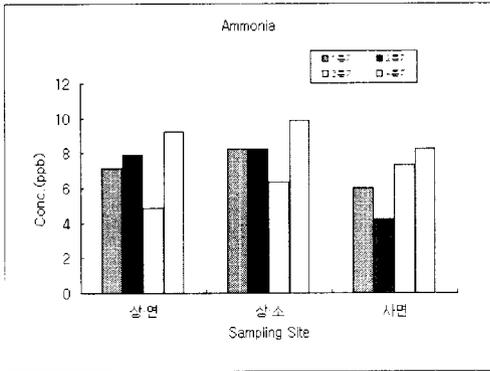


Fig. 25. The concentration distribution of Ammonia in Cheongju landfill site.

3. 매립장 가스 중 VOCs 간의 상관관계

매립장의 대기중(사면, 상부)와 배출구에서 분석한 VOCs 농도를 바탕으로 각 VOCs 별 상관관계를 조사한 결과 Fig. 26~28에서 보는 바와 같이 검출빈도가 높은 Toluene과 Benzene은 0.86, Toluene과 Chlorobenzene은 0.70, Toluene과 Etylbenzene은 0.67, Toluene과 o,m,p-xylene은 0.84의 상관관계를 가지는 반면 검출빈도가 낮은 Styrene은 Toluene과 상관관계가 0.11로 거의 없는 것으로 나타나 검출농도와 빈도가 높은 물질일 수록 상관관계가 높게 나타나는 경향을 보이고 있다.

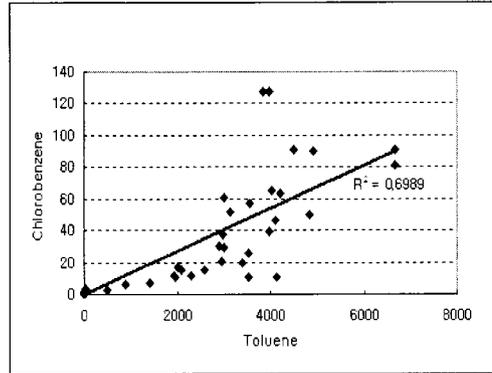
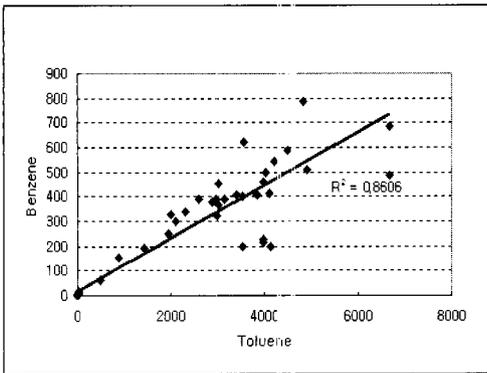


Fig. 26. The correlation Toluene vs. Benzene and Toluene vs. Chlorobenzene.

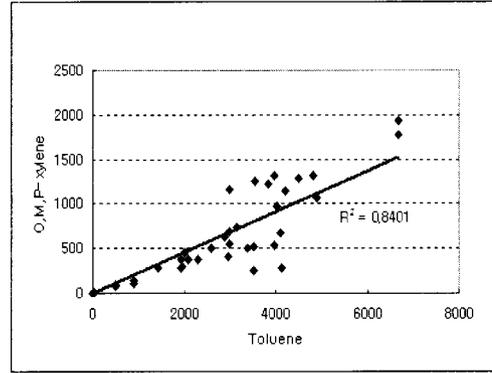
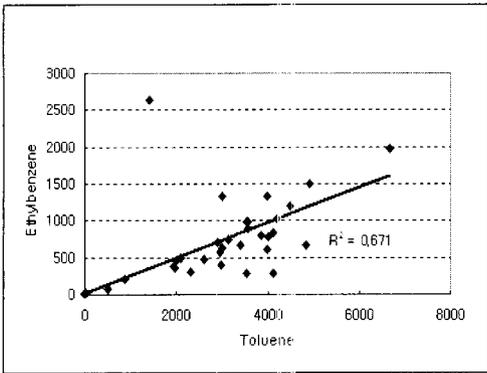


Fig. 27. The correlation toluene vs. Etylbenzene and Toluene vs. O,M,P-Xylene.

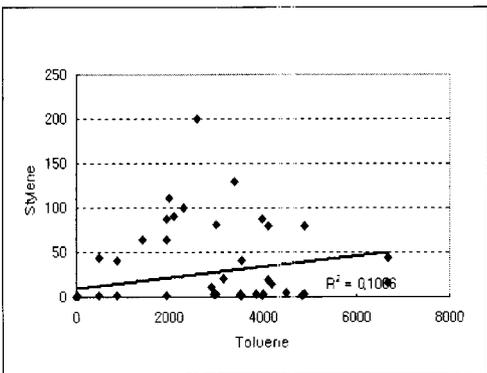


Fig. 28. The correlation Toluene vs. Styrene.

IV. 결 론

민원발생의 원인이 되는 악취유발 물질 및 VOCs 발생원을 쓰레기 매립 연수에 따라 규명하고, 발생가스 처리에 대한 자료를 제공하기 위해 청주소재 청주매립장, 문암매립장, 용정매립장을 대상으로 조사 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

1. 현재 매립이 진행중인 매립장과 매립이 종료된 지 6년 및 12년이 경과한 매립장에서 VOCs를 측정된 결과, VOCs 종류는 매립시점이 오래 될 수록 감소하는 뚜렷한 경향을 볼 수 있으나, 환경학적 중요성이 높은 BTEX계통은 꾸준히 배출되고 있음을 알 수 있었다.
2. 도시폐기물 매립장을 대상으로 한 중점연구에서 총 11종의 측정대상 VOCs 중 가스배출공에서의 농도가 가장 높은 물질은 톨루엔으로 나타났다으며, 다음으로 자일렌류와 에틸벤젠, 벤젠의 순으로 나타나 여전히 페인트나 유기용제 사용이 많은 것으로 나타났다.
3. 문암과 용정 매립장의 경우 배출구는 태양열을 이용한 이그니터(자동점화장치)등을 부착하여 고농도의 매립가스를 연속으로 연소시켜야 제거하여야 하며, 매립종료 시간경과 따라 사면과 상부의 VOCs가 거의 검출되지 않아 현재는 안전한 것으로 판단되나 청주매립장과 같이 차후에 발생할 수 있는 균열 및 가스누출에 대비하여 주기적인 VOCs항목에 대한 측정이 수반되어야 한다.

4. 문암과 용정매립장과 같이 매립후 안정화기간이 경과한 매립장의 경우 체육시설 및 공원화 사업으로 진행되는 추세에 있으므로 현행 주변환경평가와 안정화 평가시 포함되어 있는 지하수, 지표수, 토양오염도, 지반안정도에 이용자의 건강을 고려한 VOCs항목에 대한 평가도 추가되어야 한다고 사료된다.
5. 청주매립장의 악취유발물질의 가장 큰 발생원은 사면 및 소화 배출구로 판단되므로 사면에서 발생하는 가스의 포집 연소, 배출구의 연속적 연소, 침출수 배제에 대한 대책을 수립 시행할 경우 악취로 인한 민원발생 감소에 크게 기여할 것이다.
6. VOCs 별 상관관계는 농도와 검출빈도가 높을수록 높은 상관관계를 나타내고 있다.
7. 본 분석결과를 보면 매립장에서 가장 많이 발생하는 악취유발물질이 황화수소이므로 매립가스의 영향평가지 황화수소를 지표물질로 하여 관리하는 것이 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) 서울특별시, 1996, “난지도 매립지 안정화공사 실시 설계보고서”.
- 2) Thomas, G.J., Hildebrand, G., Valsaraj, k.T., Thibodeaux, L.j., and SPringer, C., 1992, "Transport of chemical vapors through soil, a landfill cover simulation experiment," *J. Hazardous Materials*, 20, 333~342.
- 3) James, K. S. and M. A Stack. 1997, "The impact of leachate collection on air quality in landfills" *Atomospheric Environment*, 34(8), 2433~2446
- 4) Schweigkofier and Niessner, 1999, "Determination of siloxanes and VOCs in landfill gas and sewage gas by canister sampling and GC MS/AES analysis." *Environmental Science & Technology*, 33, 3680~3685).
- 5) 백성욱, 김영민, 1996. “도시지역에서의 실내외 주변공기 중 휘발성 유기화합물의 농도측정에 관한 연구”, *대기환경공학회지*, 18(2), 181~187
- 6) 김민영, 윤중섭, 조석주, 김기현, 2002, “배출공을 통한 VOC 성분의 배출규모와 특성에 대한 연구: 난지도 지역을 중심으로 한 사례연구”, *한국환경분석학회지*, 5(1), 13~24
- 7) 김기현, 오상인, 최여진, 선유영, 주도원, 2003a, “매립장의 배출가스중 VOC 성분의 조성과 배출 규모: 경산시의 소규모 매립장에 대한 연구”, *한국환경분석학회지*, 6(1), 7~14
- 8) 김기현, 최규훈, 오상인, 최여진, 선우영, 전의찬, 주도원, 2003b, “광주광역시 운정동 매립장지역에 대한 VOC 성분의 배출규모와 특성에 대한 연구”, *한국환경분석학회지*, 16(5), 407~417
- 9) Cohen. Y., P. Ryan., 1989, "Chemical transport in the top soil zone-the role of moisture and temperature gradients," *journal of Hazardous Materials*,

Vol. 22, PP.283~304

- 10) Nair. S., D. Lonhwell and C. Seigneur., 1990, "Simulation of Chemical Transport in unsaturated soil," *J. Environ. Eng.*, Vol. 116, pp214~235
- 11) 이동훈, 김동민, 1991, "쓰레기 매립층에 있어서의 유해성유기화합물의 이동에 관한 이론적 연구," *대한환경공학회지*, Vol. 13, No.3, pp193~202
- 12) 이성호, 2004, "폐기물 매립장의 악취물질 플럭스 측정 및 배출 특성 연구", 동신대학교, pp30~35
- 13) 국립환경연구원, 악취공정시험방법, 2005.
- 14) 김기현, 최여진, GC/PFPD를 이용한 악취성 황화합물의 분석기법:시료의 채취방식과 검량방식에 따른 오차, *국대기환경학회 2005 춘계학술대회 논문집*, 2005, pp. 143~144.
- 15) Forlking, S. and Crill, P., 1994, "Climate controls on Temporal Variability of Methane Flux from a Poor Fen in Southeastern New Hampshire - Measurement and Modeling", *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 8, No. 4, pp.385~397
- 16) 청주시, 2007, "광역 생활폐기물 매립장 환경영향조사 보고서", pp.90~111
- 17) 송정환, 2003, "환경기초시설에서의 휘발성 유기화합물 배출특성에 관한 연구", 박사학위논문, 영남대학교 대학원, 환경공학과.
- 18) 김기현, 오상인, 최여진, 선유영, 주도원, 2003a, "매립장의 배출가스중 VOC 성분의 조성과 배출 규모: 경산시의 소규모 매립장에 대한 연구", *한국환경분석학회지*, 6(1), 7~14
- 19) 김기현, 김민영, 성우영, 오상인, 최여진, 2004, "주요 매립장 지역에 대한 VOC 성분의 조성과 배출 특성에 대한 연구"
- 20) 백성욱, 송정환, 김미현, 김수현, 원양수, 공인철, 김승현, 2003, "도시 쓰레기 매립장 지표면에서의 VOC 배출특성", *대한환경공학회지*, pp.1258~1270

- 21) 김기현, 김민영, 오상인, 윤중섭, 이강웅, 2001, “난지도를 중심으로 한 대기 중 BTEX 성분의 농도분포 특성에 대한 연구”, 한국대한환경공학회지, Vol. 17, No.6, pp463~474
- 22) 김기현, 오상인, 선우영, 최여진, 전의찬, 사재환, 임지영, 2005, “매립지 배출가스 중 휘발성유기화합물의 계절간 조성차에 대한 연구”, 한국대한환경공학회지, Vol. 21, No.2, pp259~268
- 23) 우광제, 김지형, 1997, “매립지의 VOC 배출에 관한 연구”, 대한폐기물학회지, Vol. 14, No.7, pp841~848
- 24) 이성호, 2004, “폐기물 매립장의 악취물질 플럭스 측정 및 배출 특성 연구”, 석사학위논문, 동신대학교 대학원, 환경공학과.
- 25) 정성운, 2005, “국내 매립지에서의 VOCs 배출량 산정에 관한 연구”, 석사학위논문, 건국대학교 대학원, 환경공학과.
- 26) 이승재, 2002, “불포화 토양에서 휘발성 유기오염물질의 가스상 이동 특성”, 석사학위논문, 한림대학교 대학원, 환경학과.

상수원수 응집처리시 수질변화에 관한 연구

신기호 · 신필식 · 이봉규 · 박선희 · 석태광

The effect of flocculation treatment on water quality of water supply source

K.H.Shin · P.S.Shin · B.G.Lee · S.H.Park · T.K.Suk

Industrial wastewater Section

ABSTRACT

In this study, the flocculant dosage and the aluminum concentration of two water treatment plants in which use the stream water and reservoir water as water resources are investigated. The results are as follows;

1. After flocculation and coagulation process, pH and alkalinity were scarcely changed by the flocculant dosage and time.
2. The optimal flocculant dosage was 1.3mg Al/L when turbidity was 6.4 NTU and suspended solids(SS) concentration was 4.8mg /L, and the dosage was 1.6mg Al/L when turbidity was 4.0 NTU and SS was 2.1mg/L. Therefore no relationship among turbidity, SS concentration and the optimal flocculant dosage was found.
3. In flocculation test, the optimal flocculant dosage of the A water treatment plant in Chungju and the B water treatment plant in Yeongdong were ranged from 0.9 to 3.2mg Al/L(1.2~2.6mg Al/L in site) and from 1.7 to 2.7mg Al/L(1.7~3.3mg Al/L in site), respectively.
4. The aluminum concentration of raw water and the treated water in the A water treatment plant(Chungju) were ranged from 0.0430 to 0.0864mg Al/L and from 0.1122 to 0.1366mg Al/L, respectively. For the B water treatment plant(Yeongdong), the concentration of raw water and treated water were ranged from 0.0409 to 0.0684 and from 0.0542 to 0.0803, respectively.
5. We compared the aluminum concentration of the treated water in water treatment plant and the water passed through the filtration system which is made in lab-scale. Then the concentration of the treated water in the A water treatment plant(Chungju) and the filtered water in lab were ranged from 0.1122 to 0.1366mg Al/L and from 0.0468 to 0.0806mg Al/L, respectively. For the B water treatment plant, the range of concentration were 0.0542~0.0803mg Al/L and 0.0358~0.0766 mg Al/L, respectively.
6. It is important to determine the optimal flocculant dosage for minimizing the aluminum concentration of treated water by observing

the flocculation situation in Jar Test and analyzing the water quality using several instruments.

7. The actual flocculant dosage in site and the optimal dosage determined by test were compared, so it was turned out that the flocculant has been injected 23~33% more than enough in the A water treatment plant and 16~24% more than enough in the B water treatment plant actually

I. 서론

현대사회의 급속한 발전과 산업의 급성장으로 인한 환경오염문제는 우리생활에서 여러 가지 형태로 위협하고 있다. 특히 물은 인간의 생명유지에 가장 중요한 기본 물질로 삶을 영위하기 위해 매일 일정량의 물을 필요로 한다. 따라서 다량의 상수원 확보와 깨끗하고 안전한 물을 국민들에게 제공하기 위하여 상수원수의 정수처리는 기본이며, 정수처리의 효율향상과 정수처리 후 발생하는 2차적인 오염을 예방하기 위해 다방면으로 연구가 진행되고 있다.

일반적으로 하천수와 호소수를 취수하여 상수원수로 사용하고 있으며, 상수원수의 오염을 막기 위해 여러 가지 제도적 장치가 마련되어 있다. 하지만 산업의 가속화에 따른 다양한 제품생산 등으로 새로운 환경오염물질을 유발하고 있다. 현재 우리나라에는 여러 가지 형태의 정수처리장이 운영 중인데 상수원 오염에 따른 신속한 제어가 어려운 실정이며, 현재와 같은 일반적인 정수처리 공정으로는 각종 오염원이 유입될 경우 응집, 침전, 여과, 살균 및 소독 등으로 이어지는 수처리 공정은 각종 냄새, 미량유기물질, 중금속 등의 원인물질에 대해 효과적인 제어가 어려우므로 최근에 건설되는 정수장에서는 새로운 수처리 공법을 도입 운영하고 있다.

일반적으로 상수원수는 먹는물수질기준에 적합한 수돗물을 생산하기 위해 응집, 침전, 여과, 소독, 흡착 등의 정수 공정을 거치게 되며, 이때 사용하는 약품이 수처리제이다. 수처리제는 용도에 따라 응집제, 살균·소독제, pH조정제 등으로 구분하고 있으며, 우리나라에서는 1990년 이전까지는 응집제인 황산알루미늄, 폴리염화알루미늄과 소독제인 염소 등 6종에 불과하였다. 그러나 상수원수의 수질이 악화되고 각종 수돗물 오염사고가 빈발하면서 오존, 활성탄과 같은 고도정수처리공정이 현장에 도입되었으며, 응집제 9종, 살균·소독

제 5종, 방청제 1종 기타제제 8종 등 총 23종의 수처리제가 지정되어 있다¹⁾. 환경부에서 수처리제로 고시하는 품목은 일반적으로 외국에서 널리 사용되고 있어 국내의 수돗물 정수처리에도 권장할 필요성이 있는 경우와 정수장 또는 수처리제 제조업체에서 지정 요청을 하여 고시하는 경우가 있다.

일반적으로 상수원수의 응집처리시 사용되는 응집제의 주성분은 알루미늄으로서 정수처리시 적정수준으로 제거하지 못하면 수돗물 중에 인체에 유해한 알루미늄이 잔류하게 된다. 영국의학센터 및 수질연구센터의 발표에 의하면 알루미늄이 0.11mg/L 함유된 물을 마시면 그 이하의 농도로 함유된 물을 마시는 사람보다 1.5배 정도 노인성 치매에 걸릴 확률이 높다고 보고된 바 있다²⁾. 또한 알루미늄은 섭취량의 약 1%정도가 체내 흡수되어 적당한 매개체와 함께 뇌로 이동되어 축적되는 것으로 알려져 있고, 건강한 사람의 경우 뇌 속에 알루미늄 축적량은 1mg이며 치매 증상이 있는 경우는 2 ~ 3mg의 알루미늄이 축적되어 있다는 보고가 있다³⁾.

일반적으로 상류지역 주민들이 사용하고 난 오·하수는 차집관로를 통해 하수종말처리장으로 유입되고 유입된 오·하수를 일정 수준으로 처리하여 하천으로 방류하며, 도시 하류지역 주민들은 방류한 물을 다시 상수원 취수원으로 사용하여 정수처리과정을 거쳐 음용하게 되는 물의 순환과정을 거치게 되므로 알루미늄 농도가 축적될 수 있다. 그러므로 정수처리시 응집제의 적정사용으로 알루미늄의 잔류량을 최소화하는 것이 중요하다.

본 조사연구에서는 상수원수 응집처리시 가장 많이 사용하는 응집제인 PAC와 PAHCS를 대상으로 정수장에서 주입하고 있는 응집제 양을 파악하고 Jar Test 실험을 통한 응집제 주입량과 응집후 상등수의 수질변화를 파악하여 적정응집제 주입량을 결정하므로써 알루미늄 농도를 최소화하는데 그 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 실험대상

본 조사연구에서는 하천수를 상수원수로 사용하고 있는 충주시 A정수장 1곳과 호소수를 상수원수로 사용하고 있는 영동군의 B정수장 1곳을 선정하여 5 ~ 6회에 걸쳐 시료를 채취하였다.

Fig. 1은 정수장의 일반적인 처리계통도인데 원수는 응집제 투입전인 1번 지점에서 채취하였고, 정수는 2번 지점인 각 정수장의 수도꼭지에서 5분정도 수돗물을 흘려보낸 후 채취하였다.

2. 실험재료

상수원수의 적정응집제 주입량을 확인하기 위해 현재 정수장에서 사용하고 있는 PAHCS(Poly Aluminum Hydroxy Chloro Silicate, 산화알루미늄 10.6%)와 비교 및 확인실험을 위해 PAC(Poly Aluminum Chloride, 산화알루미늄 10.1%)를 100배 희석하여 응집실험을 실시하였다.

정수장 정수의 알루미늄 농도와 실험실에서 응집반응 후 상등수를 Fig. 2에 나타난 바와 같이 제작한 여과지를 통과시킨 후 알루미늄 농도 변화를 확인해 보았다. 여과지는 원형유리관 (800 × 300mm)에 아래에서부터 굵은자갈(∅ 19 ~ 38mm, 6cm), 가는자갈(∅ 5 ~ 9mm, 3cm), 굵은모래(∅ 2 ~ 5mm, 3cm), 가는모래(∅ 0.45 ~ 0.7mm, 10cm) 순으로 4단으로 채운 여과지 모형을 제작하여 실험도구로 사용하였다.

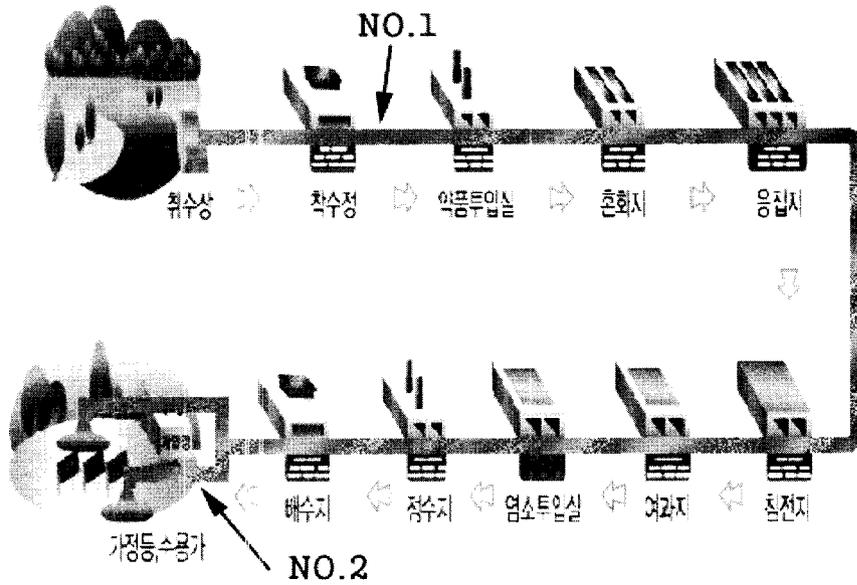


Fig. 1. The treatment diagram of water treatment plant and sampling point.

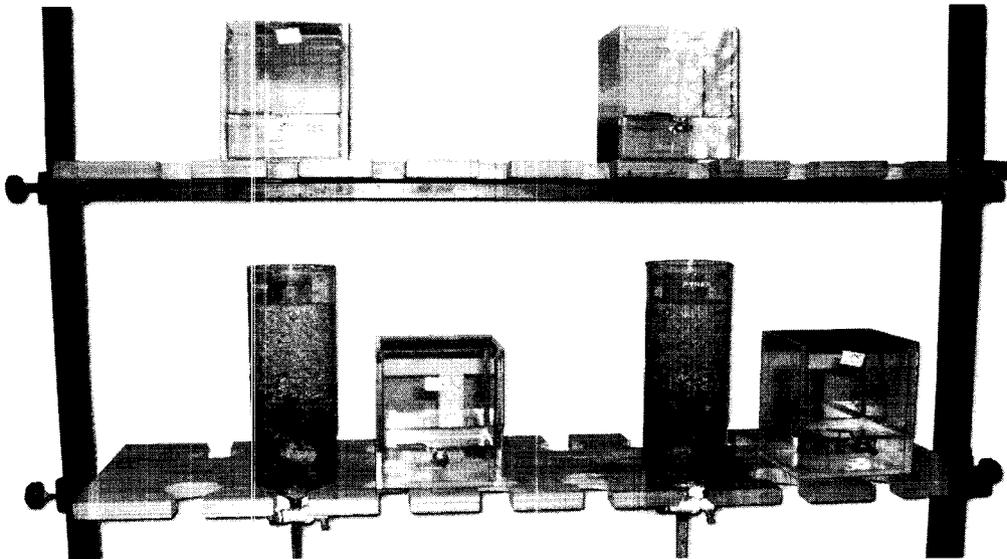


Fig. 2. Filtration bed model.

3. 응집실험 및 항목

3.1 응집실험

응집제의 적정주입량을 확인하기 위하여 응집제 주입 후 Jar Test(대한과학, Wise Stir JT-M6)를 사용하여 급속교반(135rpm, 5분), 완속교반(35rpm, 15분)으로 교반시험을 실시하였다.

적정 응집제 주입량 산정을 위해 Jar Test에 의한 Floc 및 침전상태의 육안 관찰과, Jar Test로 응집교반한 시료에 대하여 3시간 정치 후 상등수, 5A 여지여과수, Membrane Filter(0.45 μ m)를 여과한 시료에 대하여 Table 1에 나타난 분석방법으로 비교분석하여 적정응집제 주입량을 결정하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 알루미늄 농도는 ICP(Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy, Thermo Jarrell Ash, USA) 를 이용하여 분석하였으며, 알루미늄 농도가 가장 적게 검출된 시료와 육안으로는 침전된 floc의 상태를 관찰하여 적정응집제 주입량을 결정하였다.

Table 1. Items and analysis method

항 목	시 험 방 법	분 석 장 비
pH	먹는물공정시험방법	pH Meter(Orion 720A)
SS	먹는물공정시험방법	GF/C
탁도	먹는물공정시험방법	탁도계(HACH 2100AN)
알카리도	EPA Method 0310.1	적정법
알루미늄	먹는물공정시험방법	ICP(Thermo Jarrell Ash)

3.2 항목

응집에 영향을 미치는 인자는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 Table 1에 나

타난 바와 같이 pH, SS, 탁도, 알칼리도에 대하여 분석하였고, 응집제에 들어 있는 알루미늄이온의 변화를 확인하기 위해 알루미늄 농도를 분석하였으며, 기타 중금속에 대하여도 먹는물공정시험방법⁴⁾에 준하여 분석하였으나 특이한 점을 확인 할 수 없어서 본 연구에는 나타내지 않았다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. pH

Table 2는 충주A 정수장의 상수원수 취수량 및 일반항목에 대한 분석결과를 나타낸 것이며, 년중 취수량은 745 ~ 1013 m³/hr, 6회에 걸쳐 채취한 원수의 pH는 6.9 ~ 7.6으로 나타났다.

고영송⁶⁾의 잔류알루미늄 농도와 pH 관계를 보면 pH 6에서 알루미늄 용해도가 최소화 되며 pH 6이상에서 pH 증가에 따라 잔류알루미늄량이 증가하고, pH 4 ~ 5에서 응집제를 투여했을때 flocc이 커지지 않고 오히려 현탁현상이 일어난다고 보고되고 있다. 박덕준⁷⁾에 따르면 응집효율을 향상시키고 알루미늄 농도를 최소화하기 위한 적정 pH는 5.5 ~ 6.5 정도로 보고되고 있다. 본 연구에서는 응집제 주입에 따른 pH 변화를 알아보기 위해 응집제 주입 후 교반실험 전과 교반 후 1시간, 3시간 후 pH 변화를 측정해 보았다. 그 결과를 보면 Table 4에 나타난 바와 같이 응집제 주입 후 pH가 약간 떨어졌으며, 응집교반 후 1시간, 3시간 후 pH 변화는 없었다. 따라서 본 연구에서 사용된 응집제인 PAC와 PAHCS는 응집제 투입량에 따른 원수의 pH 변화와 응집교반 후 pH 변화는 영향이 없는 것으로 나타났다.

영동B 정수장의 취수량은 Table 3에 나타난 바와 같이 년중 135 ~ 145 m³/hr 로 충주A 정수장 규모에 비해 작지만 년중 취수량의 변화가 거의 없이 일정하였다. 영동B 정수장 원수의 pH는 7.0 ~ 7.4로 나타났으며, 응집제 주입

에 따른 pH 변화는 Table 4에 나타난 바와 같이 응집제 주입후 약간 떨어진 후 변화가 없었다. 본 연구에서도 별도의 pH 조절을 하지 않고, 원수의 pH 추이 만 파악하였다. 상기 결과에서 충주A 정수장과 영동B 정수장의 상수원 수는 pH가 6.9 ~ 7.7로 응집제 주입으로 인한 pH에 대한 영향은 없는 것으로 나타났으며, 응집효율 향상을 위해 별도의 pH 조절이 필요 없을 것으로 생각된다.

Table 2. Water intake and test results of Chungju A Water treatment plant

항 목 일 시	원수유량 (m ³ /hr)	pH	알카리도 (mg/L)	탁 도 (NTU)	SS (mg/L)
1월	745 ± 5	7.1	40	3.3	1.0
2월	765 ± 5	7.2	33	2.0	1.6
4월	775 ± 5	7.4	33	6.4	4.8
5월	780 ± 5	7.1	36	4.0	2.1
7월	1,013 ± 5	6.9	24	6.5	6.3
9월	923 ± 5	7.6	30	3.6	3.3

Table 3. Water intake and test results of Yongdong B Water treatment plant

항 목 일 시	원수유량 (m ³ /hr)	pH	알카리도 (mg/L)	탁 도 (NTU)	SS (mg/L)
1월	145	7.1	19	0.9	1.4
2월	145	7.0	20	1.1	2.0
5월	145	7.0	13	0.8	2.2
7월	135	7.2	15	3.4	4.6
9월	135	7.4	10	3.0	2.8

Table 4. Characteristics of pH according to coagulant dosage

시 료 명	응집제명	원 수	응집제 주입후	Jar Test 후 1hr	Jar Test 후 3hr
충주A 정수장	PAC	7.4	7.3	7.3	7.3
	PAHCS	7.4	7.3	7.3	7.3
영동B 정수장	PAC	7.3	7.2	7.2	7.2
	PAHCS	7.3	7.2	7.2	7.2

2. 알칼리도

알칼리도는 응집실험에서 중요한 요소중 하나로 알려져 있으며, 자연수중의 알칼리도는 여러 가지 물질로부터 기인되지만 pH에 따라 CO_3^{2-} , HCO_3^{2-} , OH^- 의 세가지로 대변된다. 또한 응집작용이 효과적으로 행하여지기 위해서는 응집제를 완전히 가수분해시켜 금속 수산화물의 floc을 생성시키는데 충분한 알칼리도가 수중에 필요하게 된다는 것은 일반적으로 알려진 사실이다.

Table 2에 나타난 바와 같이 충주A 정수장의 경우 알칼리도는 24 ~ 40mg/L로 응집효율에 적절한 알칼리도를 유지하고 있었다. 응집제 주입량에 따른 알칼리도 변화량을 확인해 보기 위해 Jar Test 후 알칼리도를 분석해 본 결과 Table 5와 같이 응집제 주입량 및 응집교반 후 3시간 정치 후 알칼리도 변화를 보면 응집제 주입량에 따라 알칼리도 소모량이 약간 차이를 나타내었지만 응집반응에는 별 영향이 없는 것으로 나타났다.

영동B 정수장 원수의 알칼리도는 Table 3에 나타난 바와 같이 10 ~ 20mg/L로 충주A 정수장에 비해 낮게 나타났으며, 응집제 주입량에 따른 알칼리도 소모량은 별 차이가 없었다. 상기 결과에서 PAC와 PAHCS는 응집제 주입량에 따른 알칼리도 소모량의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 5. Characteristics of Alkalinity according to coagulant dosage

시료명	응집제 주입량 (mg/L)	알카리도(mg/L)	
		원수	3시간 정치 후 상등수
충주A 정수장	1.6	28	26
	2.1	28	25
	2.7	28	24
영동B 정수장	1.1	10	9
	1.5	10	9
	2.1	10	9

3. 탁도, SS

탁도는 불용해 물질인 물속의 점토, 실트 등의 부유물질, 미세한 유기·무기 물질, 색을 띄는 유기화합물, 조류 등에 기인하며, 도시지역 대부분의 정수장들이 채택하고 있는 응집, 침전, 여과의 처리공정은 수인성 전염병을 유발하는 탁도를 제거하는데 효과적인 일련의 과정이라 할 수 있다.

6회에 걸쳐 채취한 충주A 정수장 원수 탁도는 2.0 ~ 6.5NTU로 나타났고, SS는 1.0 ~ 6.3mg/L로 나타났으며, 5회에 걸쳐 채취한 영동B 정수장 탁도는 0.8 ~ 3.4NTU, SS는 1.4 ~ 4.6mg/L로 나타났다.

김태웅⁷⁾ 등에 따르면 원수의 평균 탁도 3.7NTU인 시료에 PAC를 0 ~ 40mg Al/L로 주입하여 응집교반 후 상등수의 탁도변화를 분석해 본 결과 2mg Al/L로 주입했을때 가장 낮게 나타났으며, 4mg Al/L로 주입했을때 증가하였다고 보고되고 있다.

본 연구에서는 응집제 주입량에 따른 탁도 변화를 알아보기 위해 Jar Test

로 응집교반 후 3시간 정치시킨 상등수의 탁도를 측정해본 결과 충주A 정수장의 경우는 0.20 ~ 0.30NTU, 영동B 정수장은 0.14 ~ 0.18NTU 등으로 뚜렷한 차이를 보이지 않아 본 논문에는 나타내지 않았으며, 김태웅⁷⁾ 등은 응집제 주입량의 차이가 크므로 탁도 변화를 확인할 수 있었던 것으로 생각된다. 또한 탁도 변화에 따른 적정응집제 주입량과의 관계를 확인하기 위해 실험 하였으나 일정한 탁도별로 자연수를 채취할 수 없어 증류수에 탁도 표준품을 첨가하여 단계별로 탁도를 조제하여 시험하였지만 인위적인 탁도는 유·무기물 등에 의한 탁도가 아니므로 응집반응이 잘 이루어지지 않아 탁도 변화에 따른 적정 응집제 주입량과의 관계를 확인할 수 없었다.

정수장 원수의 탁도는 SS가 높은 7, 9월이 다른 기간에 비해 응집제 소모량이 많았지만 대상시료의 채취 횟수 및 단기간 시험 등으로 상기 시험 결과만으로 탁도 및 SS와 응집제주입량과의 상관성을 나타내는 것은 무리가 있으며, 탁도 및 SS와 응집제 주입량과의 상관성을 확인하기 위해서는 다른 변수를 추가하여 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4. 응집제 주입량 및 알루미늄 농도 변화

적정 응집제 주입량을 알아보기 위해 현재 정수장에서 사용중인 응집제인 PAHCS(Poly Aluminum Hydroxy Chloro Silicate, 산화알루미늄 10.6%)와 최근에 많이 사용되었던 PAC(Poly Aluminum Chloride, 산화알루미늄 10.1%)를 100배 희석하여 응집실험을 실시하였다.

충주A 정수장의 경우 응집제로 PAHCS를 사용하고 있었으며, Table 6, 7, Fig. 4. ~ 11에 나타난 바와 같이 응집처리를 위해 년 중 1.2 ~ 2.6 mg Al/L 정도로 응집제를 주입하여 응집처리하고 있었다. 실험실에서 Jar Test를 통해 얻은 적정 응집제 주입량은 0.9 ~ 3.2mg Al/L로 나타났다. 알루미늄 농도의 변화를 알아보기 위해 실험실에서 응집반응 후 상등수, 5A여과지 여과

수, Membrane Filter 여과수와 모형 제작한 모래여과지를 통과 시킨 여과수를 가지고 알루미늄 농도를 분석해 보았다.

충주A 정수장의 시료채취 기간별 현장 응집제 주입량과 실험실에서 Jar Test를 통해 얻은 응집제 주입량을 비교해 보면 1월의 경우 Table 6, 7, Fig. 3,에 나타난 바와 같이 현장의 응집제 주입량은 1.2mg Al/L였으며, 실험을 통한 적정응집제 주입량은 0.9 ~ 1.3mg Al/L로 나타났다. 상등수의 알루미늄 농도는 0.9mg Al/L를 주입했을때 0.1696mg/L로 가장 낮게 나타났다. 상기 결과에서 1월 적정 응집제 주입량은 0.9mg Al/L임을 알 수 있었다. 2월 정수장 응집제 주입량은 1월과 같이 1.2mg Al/L로 주입하고 있었으며, 실험을 통한 적정응집제 주입량은Fig. 4에 나타난 바와 같이 1.0 ~ 1.6mg/L로 나타났다. 상등수의 알루미늄 농도는 1.3mg Al/L일때 0.1578mg/L로 가장 낮게 나타났다. 4월 현장의 응집제 주입량은 1.5mg Al/L로 2월에 비해 응집제를 0.3mg Al/L 더 주입되고 있었으며, 실험을 통한 응집제 주입량은 Fig. 5에 나타난바와 같이 0.9 ~ 1.6mg Al/L로 나타났으며 상등수의 알루미늄 농도는 1.3mg Al/L로 주입했을때 0.1682mg/L로 가장 낮게 나타났다.

5월 현장 응집제 주입량은 4월에 비해 0.6mg Al/L가 증가한 2.1mg Al/L로 주입하고 있었으며, 실험을 통한 응집제 주입량은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 1.0 ~ 1.6mg Al/L로 나타났다. 상등수의 알루미늄 농도는 1.6mg Al/L로 주입했을때 0.1833mg/L로 가장 낮게 나타났다. 7월 현장 응집제 주입량은 2.6mg Al/L 였으며, 실험을 통한 응집제 주입량은 Fig. 7, 8에 나타난 바와 같이 2.7 ~ 3.7mg Al/L로 5월에 비해 상당히 높게 나타났다. 7월은 5월에 비해 탁도 및 SS 농도가 상대적으로 높게 나타났다. 상등수의 알루미늄 농도는 3.2mg Al/L 주입했을때 0.1353mg/L로 가장 낮게 나타났다. 9월 현장 응집제 주입량은 1.9mg Al/L 였으며, 실험을 통한 응집제 주입량은 Fig. 9, 10에 나타난 바와 같이 2.7 ~ 3.7mg Al/L로 7월과 비슷하게 나타났다. 상등수의 알

루미늄 농도는 3.2mg Al/L 주입했을때 0.1254mg/L로 가장 낮게 나타났다. 각 정수장에서 채취한 원·정수의 알루미늄 농도를 분석한 결과를 Table 8에 나타난 바와 같이 7월 원수의 알루미늄 농도는 0.0430mg/L, 정수는 0.1122mg/L였으며, 원수에 비해 정수의 알루미늄 농도가 상당히 높게 나타났다. 실험실에서 모래여과지 모형을 제작하여 응집반응 후 상등수를 모형여과지를 통과 시킨 후 알루미늄 농도를 분석한 결과 0.0468 ~ 0.0806mg/L로 나타났다. 이는 정수장 정수의 알루미늄 농도에 비해 28 ~ 58% 정도 낮게 나타났다. 9월 현장 응집제 주입량은 1.9mg Al/L였으며, 실험을 통한 적정응집제 주입량은 Fig. 9, 10에 나타난 바와 같이 2.7 ~ 3.7mg Al/L로 나타났다. 상등수의 알루미늄 농도는 3.2mg Al/L 주입했을 때 0.1254mg/L로 가장 낮게 나타났다.

7월 정수의 알루미늄 농도는 0.1122mg/L, 실험실에서 제작한 여과지를 통과 시킨 여과수의 알루미늄 농도는 0.0468mg/L로 현장에 비해 약 59% 정도 낮게 나타났다. 9월 정수의 알루미늄 농도는 0.1189mg/L, 실험실에서 제작한 여과지를 통과시킨 여과수의 알루미늄 농도는 0.0582mg/L로 현장에 비해 약 51% 정도 낮게 나타났다. 상기 결과에서 알루미늄 농도를 최소화하기 위해 여과지의 관리가 중요함을 알 수 있었다. 년중 응집제 주입량 추이를 Fig. 11에 나타내었는데, 실험실에서 Jar Test를 통해 구한 적정응집제 주입량을 보면 1월부터 5월까지의 응집제 주입량이 일정하였으며, 7월과 9월에 응집제 주입량이 많아진 것을 확인할 수 있었다.

Table 6. Characteristics of Alumium concentration according to coagulant dosage(ChungJu A, PAHCS)

채취 일자	현장주입량 (mg)	Jar Test 주입량(mg)	Jar Test 후 농도(mg/L)			
			상등수	5A여과	Membrane	모래여과
1월	1.2	0.9	0.1696	0.1085	0.1424	-
		1.1	0.1872	0.1263	0.1488	-
		1.3	0.1975	0.1306	0.1527	-
2월	1.2	1.0	0.1842	0.1244	0.1674	-
		1.3	0.1578	0.1126	0.1542	-
		1.6	0.1912	0.1343	0.1625	-
4월	1.5	0.9	0.1874	0.1508	0.1613	-
		1.3	0.1682	0.1204	0.1268	-
		1.6	0.1746	0.1466	0.1304	-
5월	2.1	1.0	0.1978	0.1323	0.1624	-
		1.3	0.1968	0.1114	0.1506	-
		1.6	0.1833	0.1146	0.1462	-
7월	2.6	2.7	0.1660	0.1487	0.1323	0.0643
		3.2	0.1353	0.1146	0.1277	0.0468
		3.7	0.1438	0.1094	0.1294	0.0806
9월	1.9	2.7	0.1506	0.1231	0.1337	0.0744
		3.2	0.1254	0.0785	0.0924	0.0631
		3.7	0.1792	0.0854	0.1046	0.0582

Table 7. Characteristics of Alumium concentration according to coagulant dosage(ChungJu A, PAC)

채취 일자	현장주입량 (mg)	Jar Test 주입량(mg)	Jar Test 후 농도(mg/L)			
			상등수	5A여과	Membrane	모래여과
1월	1.2	0.8	0.1746	0.1134	0.1446	-
		1.0	0.1884	0.1247	0.1522	-
		1.2	0.2065	0.1262	0.1538	-
2월	1.2	0.9	0.2165	0.1287	0.1542	-
		1.2	0.1886	0.1168	0.1426	-
		1.5	0.1932	0.1348	0.1588	-
4월	1.5	0.8	0.1968	0.1542	0.1644	-
		1.2	0.1645	0.1228	0.1325	-
		1.5	0.1708	0.1435	0.1506	-
5월	2.1	0.9	0.1936	0.1466	0.1706	-
		1.2	0.2034	0.1355	0.1425	-
		1.5	0.2066	0.1284	0.1408	-
7월	2.6	2.5	0.1838	0.1429	0.1504	0.0663
		3.0	0.1535	0.1254	0.1272	0.0544
		3.5	0.1692	0.1286	0.1363	0.0766
9월	1.9	2.5	0.1816	0.1294	0.1406	0.0726
		3.0	0.1455	0.1178	0.1247	0.0491
		3.5	0.1795	0.1217	0.1347	0.0554

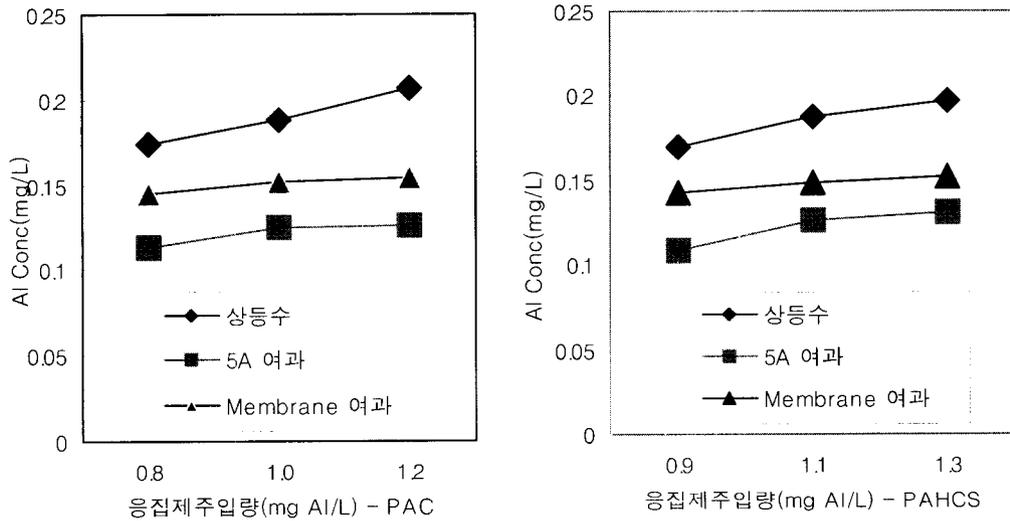


Fig. 3. Al concentration according to flocculation dosage(ChungJu A - January).

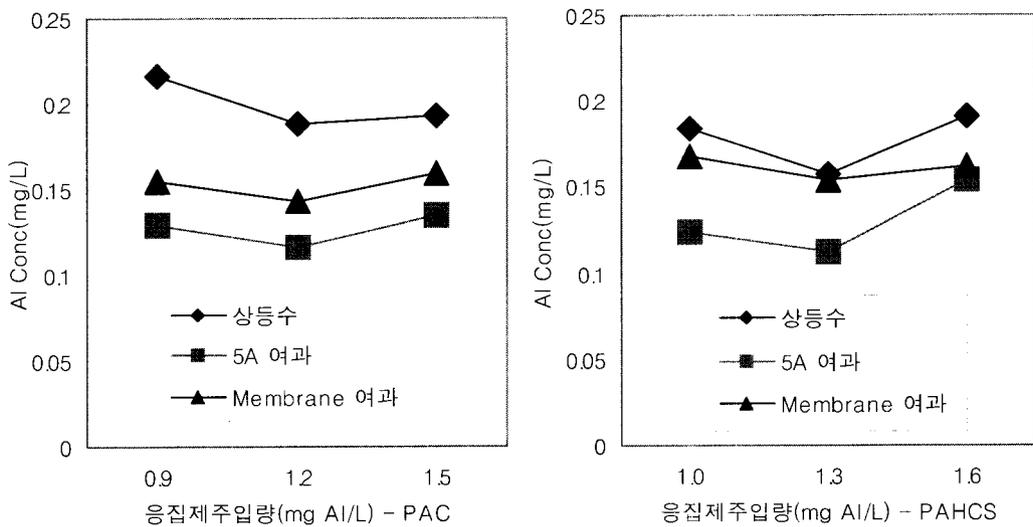


Fig. 4. Al concentration according to flocculation dosage(ChungJu A - February).

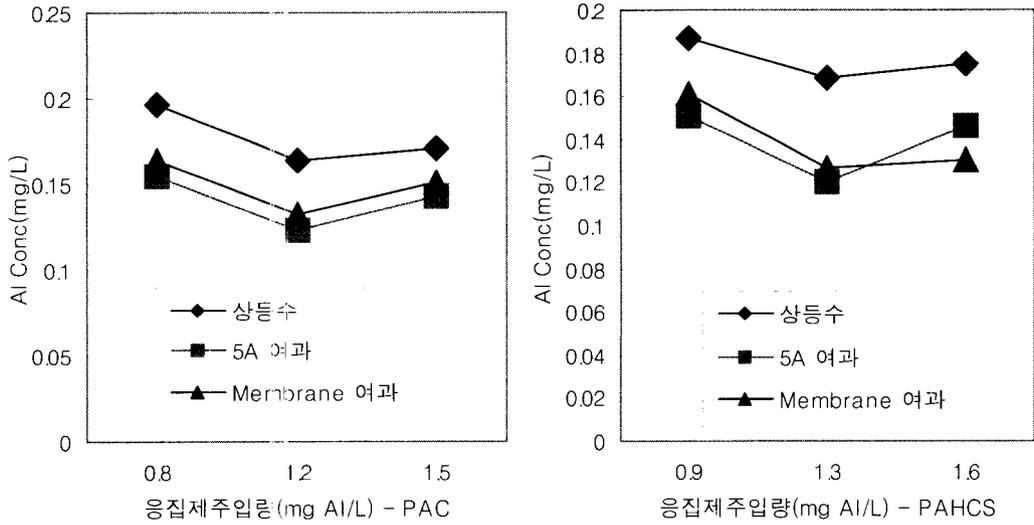


Fig. 5. Al concentration according to flocculation dosage(ChungJu A - April).

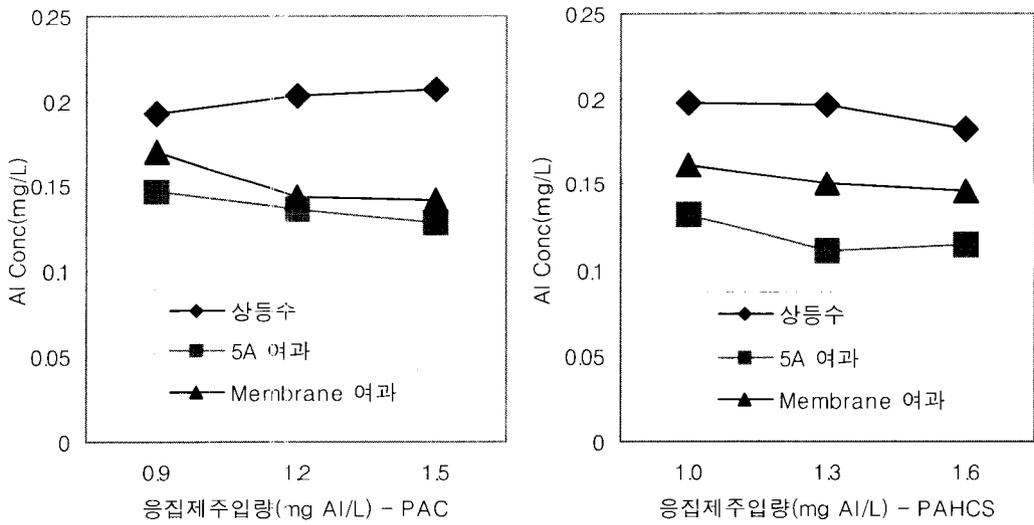


Fig. 6. Al concentration according to flocculation dosage(ChungJu A - May).

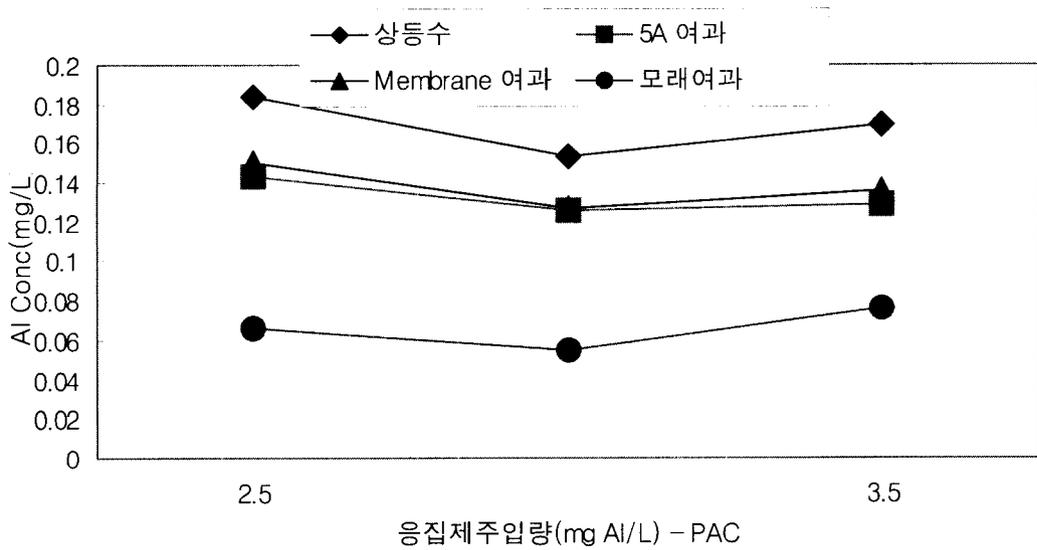


Fig. 7. Al concentration according to flocculation dosage(ChungJu A - July).

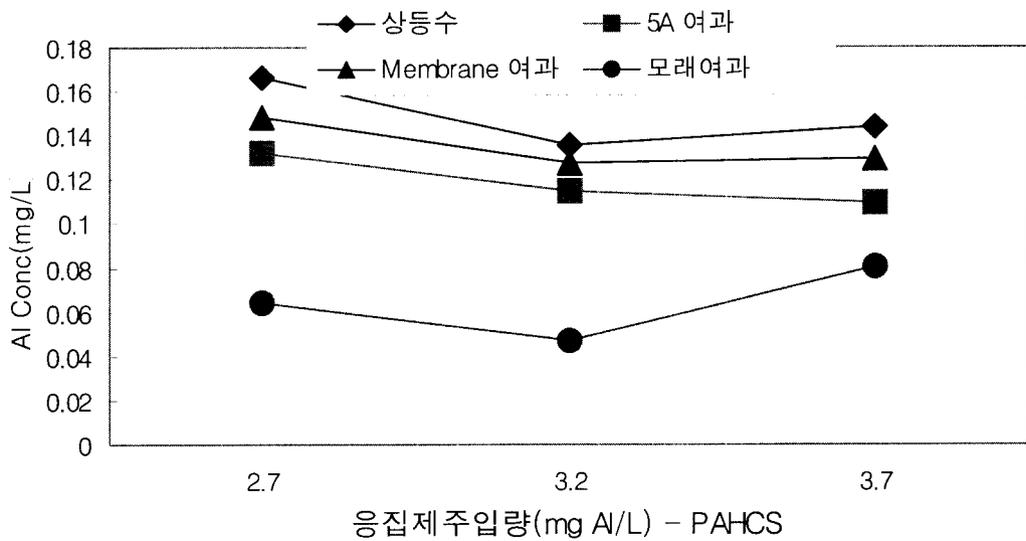


Fig. 8. Al concentration according to flocculation dosage(ChungJu A - July).

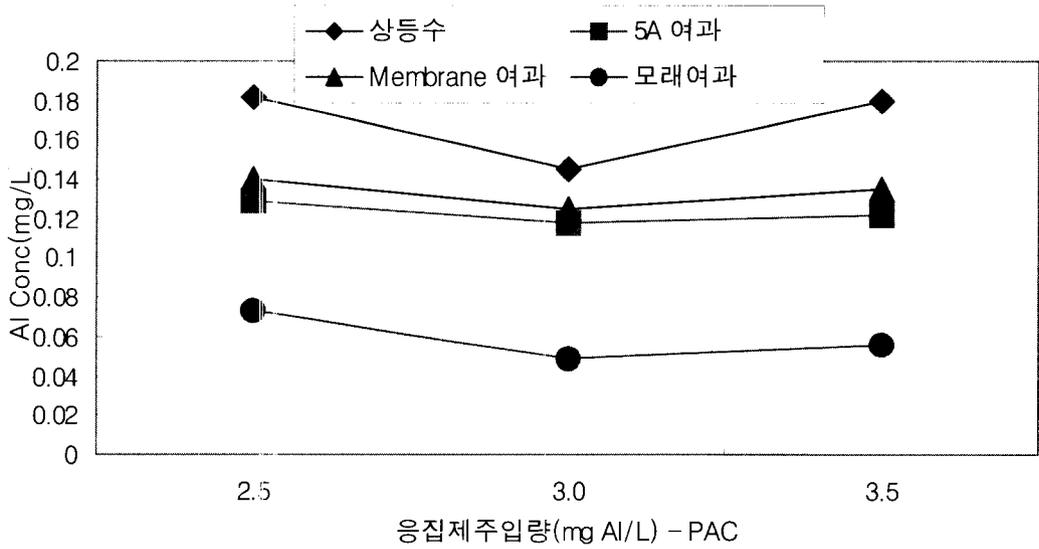


Fig. 9. Al concentration according to flocculation dosage(ChungJu A - September).

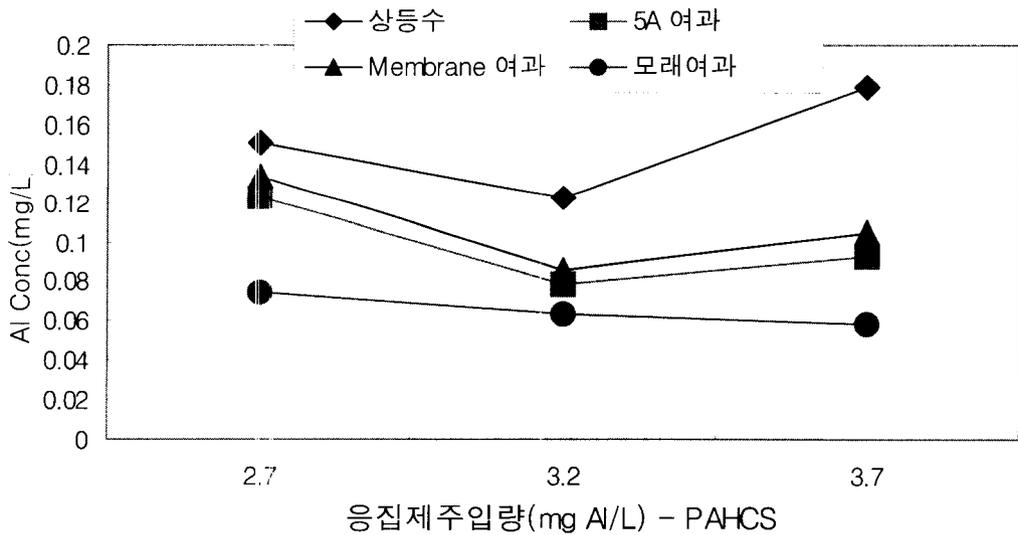


Fig. 10. Al concentration according to flocculation dosage(ChungJu A - September).

Table 8. Aluminum concentration of raw water resource

Unit : mg/L

시 료 명	채 취 일 자	원 수	정 수
충주A 정수장	1월	0.0546	0.1246
	2월	0.0744	0.1185
	5월	0.0864	0.1366
	7월	0.0430	0.1122
	9월	0.0512	0.1189
	평균	0.0619	0.1221
영동B 정수장	1월	0.0409	0.0542
	2월	0.0459	0.0628
	5월	0.0524	0.0732
	7월	0.0549	0.0628
	9월	0.0684	0.0803
	평균	0.0525	0.0667

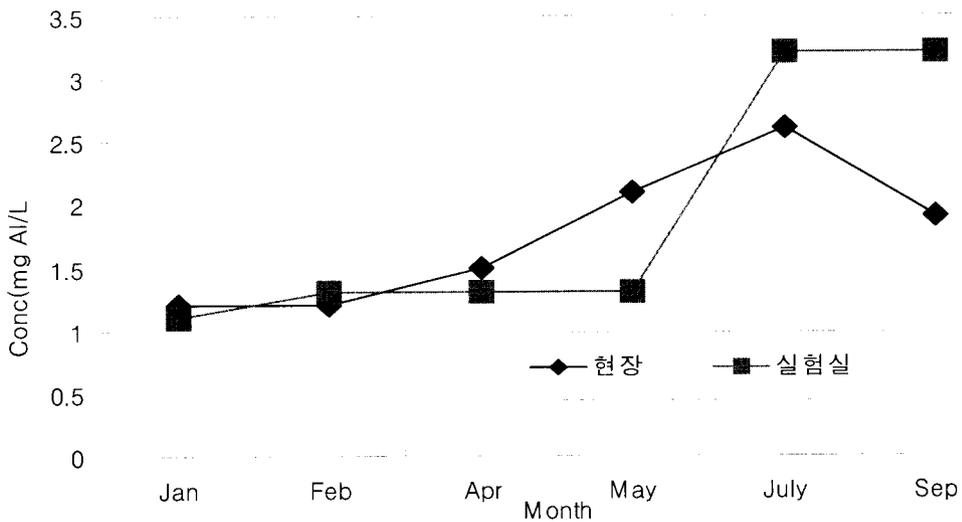


Fig. 11. Flocculation dosage of in-site and Lab(ChungJu A).

9월을 제외한 년중 응집제 주입량은 실험을 통한 적정 응집제 주입량에 비해 현장에서 8 ~ 23%정도 많게 주입하고 있는 것으로 나타났다.

상기 결과에서 알 수 있듯이 알루미늄 농도를 최소화하기 위해서는 유기물질 및 부유물질 제거 과정인 응집침전 과정에서 적정 응집제의 주입이 중요하며 가장 효과적인 방법은 여과지의 적정관리임을 알 수 있었다. 적정 응집제 주입량을 구하기 위해 Jar Test 후 상등수의 알루미늄 농도를 분석하여 알루미늄 농도가 가장 낮은 경우를 적정 응집제 주입량으로 결정하는 것도 좋은 방법이라 생각된다.

Table 9, 10은 영동B 정수장의 현장 응집제 주입량과 Jar Test를 통한 적정 응집제 주입량을 나타낸 것이다. 영동B 정수장의 응집제 주입량에 따른 알루미늄 농도를 보면 1월 현장에서 응집제 주입량은 PAHCS 2.2mg Al/L였고, Fig. 12에 나타난 바와 같이 실험을 통한 적정 응집제 주입량과 이에 따른 알루미늄 농도를 보면 적정 응집제 주입량은 1.3~2.1mg Al/L로 나타났고, 1.7mgAl/L일때 0.1967mg/L로 낮게 나타났다.

2월 현장 응집제 주입량은 1.7mg Al/L였고 Fig. 13에 나타난 바와 같이 실험을 통한 적정 응집제 주입량은 1.3 ~ 2.1mg/L로 나타났으며, 상등수의 알루미늄 농도는 1.3mg Al/L일때 0.1936mg/L로 가장 낮게 나타났다. 5월 현장의 응집제 주입량은 2.5mg Al/L였고, 실험을 통한 적정 응집제 주입량은 1.3 ~ 3.0mg Al/L로 나타났으며, Fig. 14에 나타난바와 같이 상등수의 알루미늄 농도는 2.1mg Al/L일때 0.2433mg/L로 가장 낮게 나타났다.

Table 9. Characteristics of Aluminum concentration according to coagulant dosage(YoungDong B, PAHCS)

채취 일자	현장주입량 (mg)	Jar Test 주입량(mg)	Jar Test 후 농도(mg/L)			
			상등수	5A여과	Membrane	모래여과
1월	2.2	1.3	0.2067	0.1408	0.1482	-
		1.7	0.1967	0.1336	0.1465	-
		2.1	0.2155	0.1384	0.1477	-
2월	1.7	1.3	0.1936	0.1488	0.1543	-
		1.7	0.2069	0.1048	0.1084	-
		2.1	0.3438	0.1215	0.1068	-
5월	2.5	1.3	0.2896	0.1255	0.1282	-
		2.1	0.2433	0.1084	0.0988	-
		3.0	0.3145	0.1132	0.1258	-
7월	3.3	2.1	0.2886	0.1285	0.1324	0.0624
		2.7	0.2513	0.1186	0.1044	0.0526
		3.2	0.2966	0.1224	0.1038	0.0612
9월	3.3	1.1	0.1776	0.0831	0.0884	0.0628
		1.5	0.1429	0.1119	0.0835	0.0504
		2.1	0.1014	0.0752	0.0785	0.0405

Table 10. Characteristics of Aluminum concentration according to coagulant dosage(YoungDong B, PAC)

채취 일자	현장주입량 (mg)	Jar Test 주입량(mg)	Jar Test 후 농도(mg/L)			
			상등수	5A여과	Membrane	모래여과
1월	2.2	1.2	0.2746	0.1442	0.1564	
		1.6	0.2582	0.1506	0.1538	
		2.0	0.2833	0.1586	0.1612	
2월	1.7	1.2	0.2806	0.1264	0.1248	
		1.6	0.2789	0.1042	0.1134	
		2.0	0.2975	0.1172	0.1216	
5월	2.5	1.2	0.3059	0.1266	0.1283	
		2.0	0.2596	0.1025	0.1062	
		2.8	0.3294	0.1144	0.1203	
7월	3.3	2.0	0.2824	0.1134	0.1235	0.0766
		2.5	0.2345	0.0924	0.0865	0.0574
		3.0	0.2468	0.1062	0.1126	0.0628
9월	3.3	1.0	0.1835	0.1129	0.1592	0.0628
		1.4	0.1199	0.0827	0.1322	0.0575
		2.0	0.1043	0.0862	0.1182	0.0358

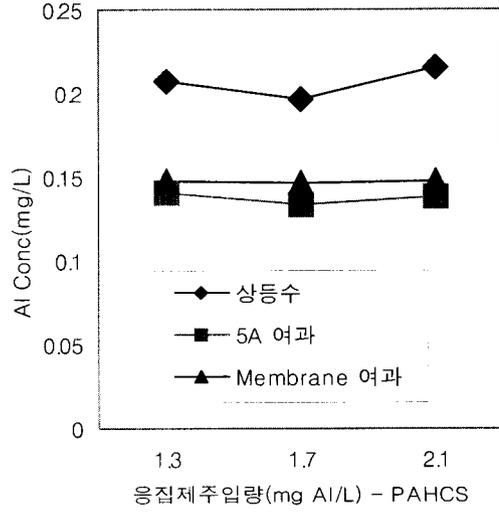
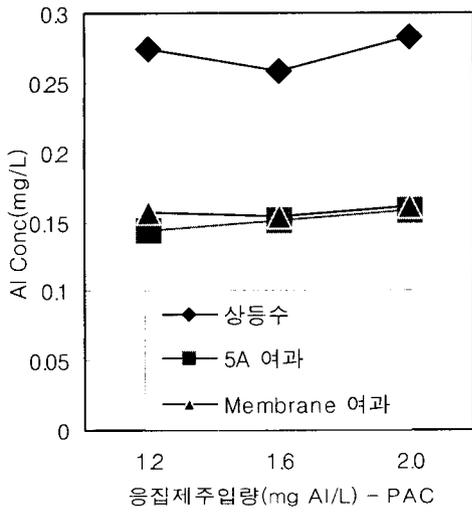


Fig. 12. Al concentration according to flocculation dosage(YoungDong B - January).

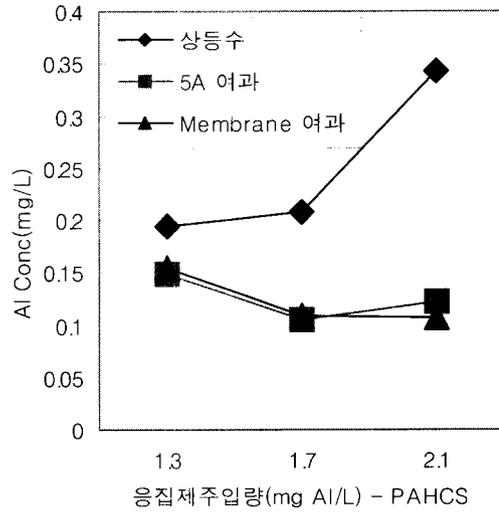
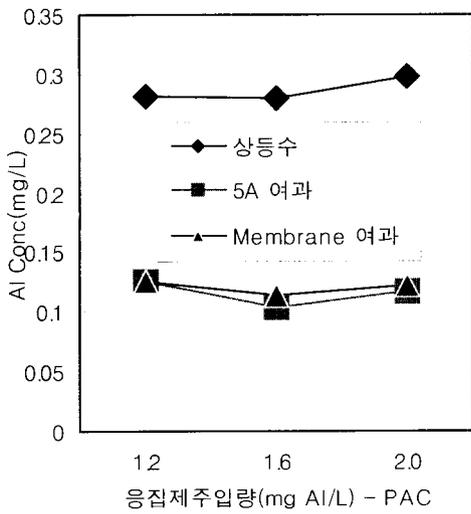


Fig. 13. Al concentration according to flocculation dosage(YoungDong B- February).

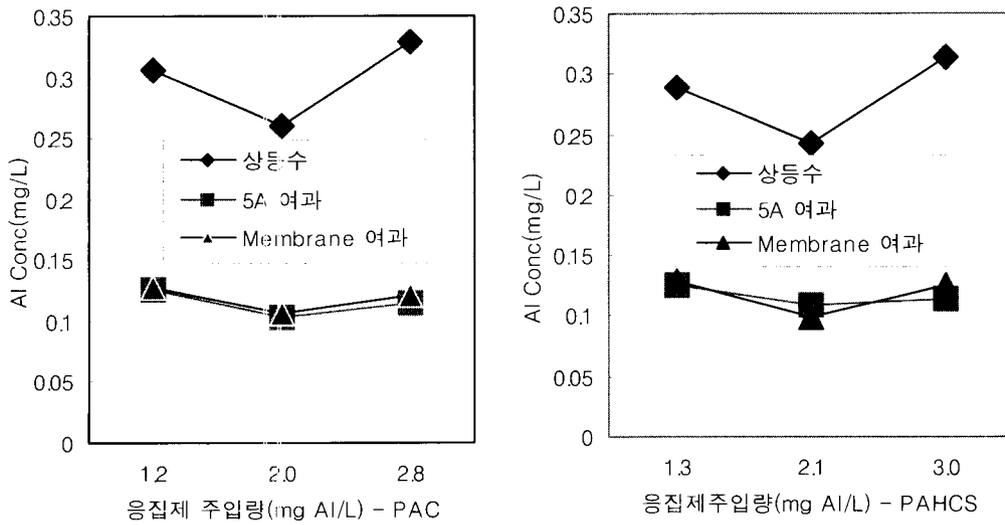


Fig. 14. Al concentration according to flocculation dosage(YoungDong B - May).

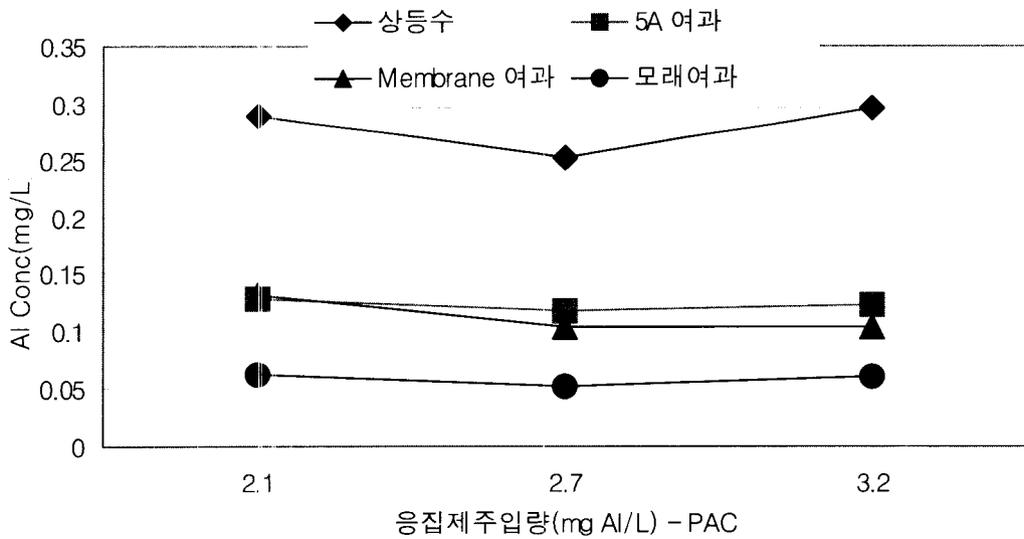


Fig. 15. Al concentration according to flocculation dosage(YoungDong B - July).

7월의 현장의 응집제 주입량은 3.3mg Al/L, 실험을 통한 응집제 주입량은 2.1 ~ 3.2mg Al/L로 나타났으며, Fig. 15, 16에 나타난 바와 같이 상등수의 알루미늄 농도는 2.7mg Al/L 일때 0.2513mg/L로 가장 낮게 나타났다. 9월 현장 응집제 주입량은 3.3mg Al/L, 실험을 통한 응집제 주입량은 1.1 ~ 2.1mg Al/L로 현장과 실험을 통한 적정 응집제 양과의 차이가 많았다. Fig. 17, 18에 나타난 바와 같이 실험을 통한 상등수의 알루미늄 농도는 2.1mg Al/L일때 0.1014mg/L로 가장 낮게 나타났다. 실험실에서 자체 제작한 여과지를 통과시킨 여과수의 알루미늄 농도와 정수장 정수의 알루미늄 농도를 비교해 보면 7월 정수장 정수의 알루미늄 농도는 0.0628mg/L였고, 실험실에서 제작한 여과지를 통과시킨 여과수 0.0526 ~ 0.0624mg/L로 정수장에 비해 약간 낮게 나타났다. 9월의 경우는 현장 정수의 알루미늄 농도가 0.0803mg/L, 실험실 여과수의 농도는 0.0405 ~ 0.0628mg/L로 현장 정수의 알루미늄 농도에 비해 약 22% ~ 50%정도 낮게 나타났다. 상기 결과에서 보듯이 정수장에서 여과지 관리상태에 따라 알루미늄 농도에 차이를 보였으며, 이는 여과지를 적정관리하면 알루미늄 농도를 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 충주A 정수장의 응집제 주입량은 겨울과 봄은 일정하였고, 여름으로 가면서 응집제 주입량이 늘었으며 가을에는 여름에 비해 적정 응집제 주입량이 줄어드는 경향을 보였다. Fig. 11은 년중 현장의 응집제 주입량과 실험실에서 Jar Test를 통해 얻은 적정응집제 주입량을 나타낸 것인데 일반적으로 실험실보다 현장에서 약 23 ~ 33%정도 더 많이 주입하고 있는 것으로 나타났다.

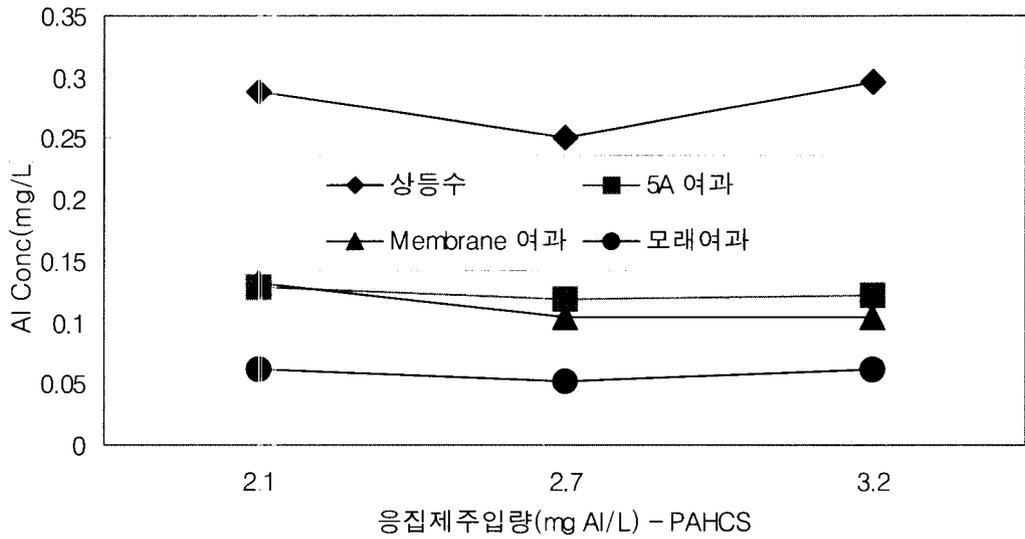


Fig. 16. Al concentration according to flocculation dosage(YoungDong B - July).

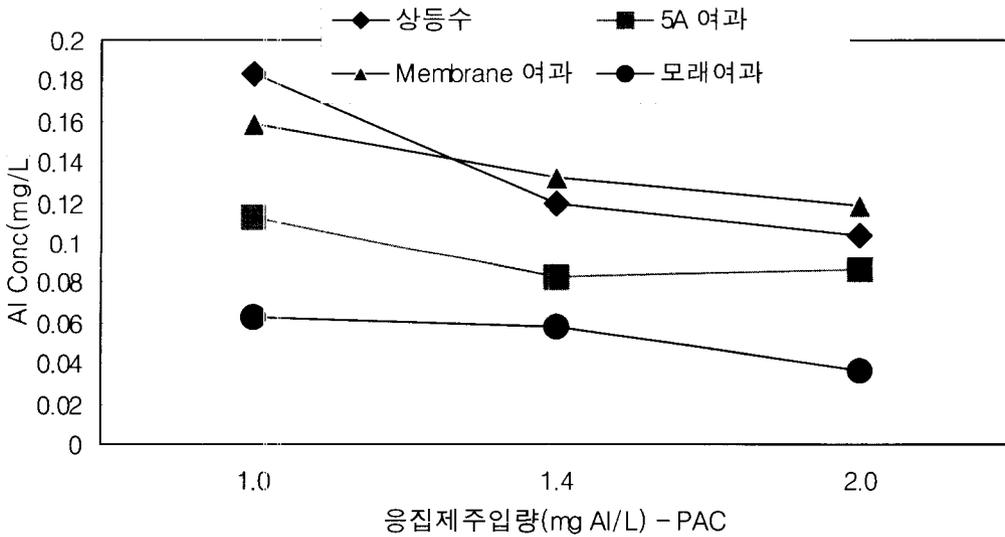


Fig. 17. Al concentration according to flocculation dosage(YoungDong B- September).

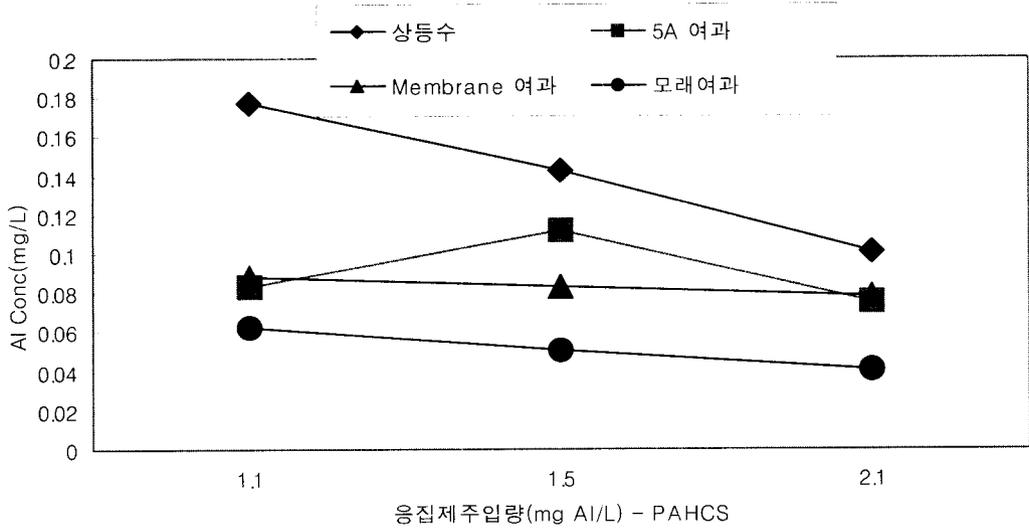


Fig. 18. Al concentration according to flocculation dosage(YoungDong B- September).

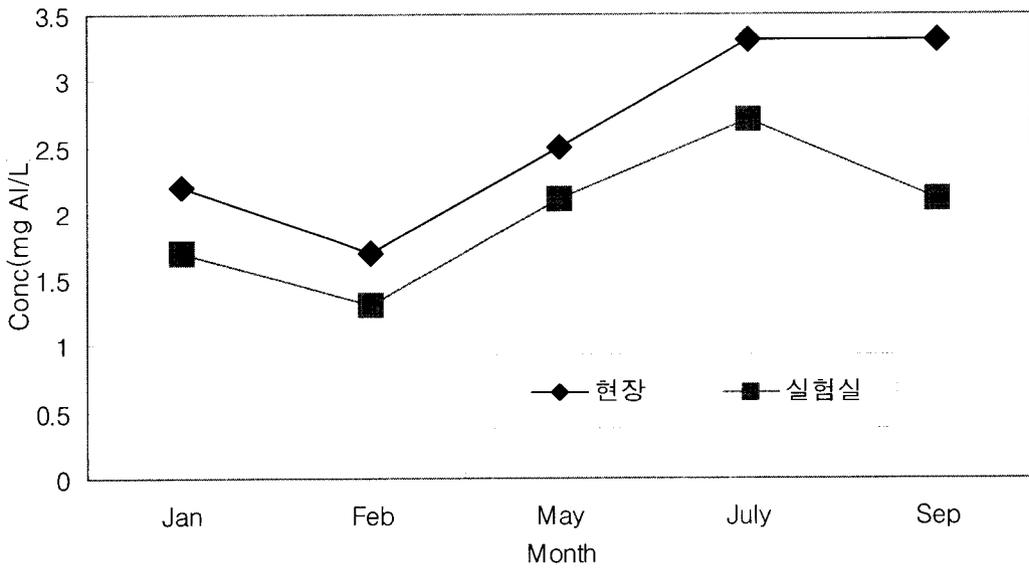


Fig. 19. Flocculation dosage of in-site and Lab(YoungDong B).

영동B 정수장의 응집제 주입량의 추이를 보면 현장에서는 1.7 ~ 3.3mg Al/L 정도로 주입하고 있었으며, 실험을 통한 적정 응집제 주입량은 1.7 ~ 2.7mg Al/L로 나타났다. Fig. 19는 년중 현장의 응집제 주입량과 실험실에서 Jar Test를 통해 얻은 적정응집제 주입량을 비교해 본 것인데 전체적인 추이는 비슷한 경향을 나타냈으며, 9월을 제외한 년중 응집제 주입량은 실험을 통한 적정 응집제 주입량에 비해 현장에서 16 ~ 24%정도 더 많이 주입하고 있는 것으로 나타났다. 영동B 정수장의 응집제 주입량은 겨울과 봄은 일정하였고, 여름으로 가면서 응집제 주입량이 늘었으며 가을에는 응집제 주입량이 봄 수준과 비슷한 경향을 나타냈다. 충주A 정수장에 비해 연간 응집제 주입량의 범위가 작았는데, 이는 충주A 정수장의 취수원은 하천수인데 비해 영동B 정수장의 취수원은 호소수로 물이 정체 시간이 길어 보다 안정된 상태에서 취수할 수 있기 때문인 것으로 생각된다.

IV. 결 론

도내에서 하천수와 호소수를 상수원수로 사용하고 있는 정수장의 응집제 투입량과 알루미늄 농도를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 응집교반 후 응집제 투입량과 시간변화에 따른 pH, 알카리도 변화를 확인해 본 결과 농도의 변화는 거의 없었다.
2. 탁도 6.4 NTU, SS 4.8mg/L일때 적정응집제 투입량이 1.3mg/L였고, 탁도 4.0 NTU, SS 2.1mg/L일때 적정응집제 투입량이 1.6mg/L로 탁도 및 SS 농도와 적정 응집제 투입량과의 상관성은 확인 할 수 없었다.
3. 응집시험 결과 적정 응집제 투입량은 충주A 정수장은 0.9 ~ 3.2mgAl/L(현장 1.2 ~ 2.6mg Al/L), 영동B 정수장은 1.7 ~ 2.7mg Al/L(현장1.7 ~ 3.3mg Al/L)로 나타났다.
4. 알루미늄 농도는 충주A 정수장에서 원수가 0.0430 ~ 0.0864mg/L, 정수가 0.1122 ~ 0.1366mg/L였고 영동B정수장 원수는 0.0409 ~ 0.0684, 정수가 0.0542 ~ 0.0803mg/L로 나타났다.
5. 정수장 정수와 자체 제작한 여과지를 통과시킨 상등수의 알루미늄 농도를 비교한 결과 충주A 정수장 정수는 0.1122 ~ 0.1366mg/L, 자체 실험결과 0.0468 ~ 0.0806mg/L로 나타났고 영동B 정수장 정수는 0.0542 ~ 0.0803mg/L, 자체 실험결과 0.0358 ~ 0.0766mg/L로 나타났다.

6. 적정응집제 주입량 결정을 위해 Jar Test에 의한 응집상태의 육안 관찰과 상등수에 대한 기기분석을 병행하여 알루미늄 농도가 최소화 될 수 있도록 적정응집제 주입량을 결정하는 것이 중요하다고 생각된다.
7. 년중 현장 응집제 주입량과 실험을 통한 적정 응집제 주입량을 비교해본 결과 충주A 정수장은 23 ~ 33%정도, 영동B 정수장은 16 ~ 24%정도 현장에서 응집제 주입량이 더 많이 주입하고 있었다.

참고문헌

1. 환경부 고시 제2007-92호, 수처리제의 기준과 규격 및 표시기준
2. Robert G.Miller, Frederick, Kopfler, Keith C. Kelty, Judy A Stober and Nancy S. Ulmer, The Occurance of Al in Driking water, AWWA(1984)
3. Ho Suet-mei and Tso Wing-Shiu, Sanitary and Health Aspects of Alum in Driking water, International Workshop, IWSA, pp. 11 ~21(1992)
4. 환경부 고시 제2007-146호 먹는물공정시험방법. 2007
5. 고영송, 정수처리시 잔류알루미늄 농도를 최소화하기 위한 영향인자 고찰 (1995), 건국대학교
6. 박덕준, 정수시 알루미늄계 응집제 사용에 따른 잔류알루미늄의 농도변화 (1995), 충남대학교
7. 김태웅 외 3인, 응집시의 교반강도(G) 및 교반시간(T)을 이용한 응집제별 최적응집조건에 관한 연구,대한환경공학회, 2005. pp. 262-267

청주지역의 지하수 수질특성에 관한 연구

민윤희 · 이진원 · 유병열 · 장은경 · 송영상 · 임경미 · 임종현

먹는물검사과

A Study on the Characteristic of the Groundwater Quality in Cheongju Area

Y.H.Min, J.W.Lee, B.Y.Yoo, E.K.Chang, Y.S.Song, K.M.Lim, J.H.Lim

Abstract

In this research, characteristics of groundwater were investigated in Cheongju area from February to November, 2007. The surveyed area was classified into four compartments: residential area, commercial area, industrial area, green area.

20 points were sampled seasonally for each area. 43 items out of 46 items(drinking water standards)excepting 3 items related to micro-organisms, and inorganic substances such as Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} have been investigated.

The results were as follows.

1. Residential area: nitrate nitrogen($\text{NO}_3\text{-N}$, harmful inorganic substance) and color, turbidity, total dissolved solids(aesthetic substance) exceeded the drinking water standards more frequently than the other contaminants.

Standard(drinking water) excess rate of nitrate nitrogen($\text{NO}_3\text{-N}$) showed much higher value than those of the other exceeding items, because population congestion probably caused the abundant discharge of the sewage and filthy water which are highly containing the nitrate nitrogen($\text{NO}_3\text{-N}$) trace materials to the shallow ground water.

2. Commercial area: ammonium nitrogen and nitrate nitrogen($\text{NH}_3\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$, harmful inorganic substance), color, total dissolved solids, manganese(aesthetic substance) and so on exceeded the drinking water standards a little more frequently than the other contaminants.

Standard(drinking water) excess rate of manganese showed the highest of all the other exceeding items' because manganese is one of the most prevalent elements in the earth's crust and a great quantity of manganese is distributed over the rock layers in this area.

3. Industrial area: fluoride and nitrate nitrogen(F and $\text{NO}_3\text{-N}$, harmful inorganic substance) and tetrachloroethylene, trichloroethylene, dichloromethane, 1,1dichloroethylene, and so on exceeded the drinking water standard more frequently than the other contaminants. Among these exceeding items, some volatile organic compounds(VOCs) showed

much higher concentration value in a industrial area than the other surveyed areas because of the leakage of volatile organic compounds(VOCs) out of the waste treatment facilities, the drains and underground storage tanks of some factories which use volatile organic compounds(VOCs) as a fuel or raw materials.

4. Green area: Standard(drinking water) excess rate of nitrate nitrogen($\text{NO}_3\text{-N}$, harmful inorganic substance) showed a higher value than those of the other exceeded items because the depth of the wells is below 20m, hence the wells can be easily contaminated by livestock farming waste water, fertilizers, and household sewage.

5. The contents of mineral such as potassium ion and sodium ion have been shown to be comparatively high value in a commercial area in comparison with the other areas, which is due to the influence of artificial contaminating sources such as household sewage, filthy water, and so on. Whereas the contents of calcium ion and magnesium ion have been shown to be below the drinking water standards and on the whole to be almost the same value for each area.

I. 서론

물은 인간과 모든 생물체에게 필요불가결한 물질로써 인간은 생활수준이 향상될수록 맛이 있고, 안전하고, 건강식이며, 오염되지 않은 양질의 물을 음용하려는 욕구를 가지고 있다. 일반적으로 생활수준이 높은 구미 선진국일수록 음용수로써 지하수의 이용도는 상당히 높아 그 의존도는 60~90%에 이른다.¹⁾

지하수와 지표수의 근원은 강수로써 국내에 내리는 연간 강수량은 1,267억 m^3 인데 반해 국내의 지하수 부존량은 연간 강수량의 12배에 해당하는 15,440억 m^3 에 해당하는 막대한 규모이다.¹⁾ 연간 65%가 비풍수기인 우리나라의 수문특성상 이 시기의 하천수중 그 대부분이 풍수기에 강수가 지하로 침투된 후 지하수로 변했다가 갈수기에 다시 하천을 통해 서서히 지표로 배출되는 지하수임을 감안한다면 지하수자원의 오염은 지표수자원의 오염과 직결되어 있고, 따라서 범정부차원의 오염된 지하수의 정화정책이 얼마나 시급한 명제인가를 쉽게 알 수 있을 것이다.

우리나라는 1993년 지하수법이 제정되기까지 선진국처럼 지하수 관련법이 없어서 아무런 제재나 절차도 없이 지하수를 개발·사용하여 왔다. 무절제한 개발 및 과잉 양수는 지하수원의 고갈뿐만 아니라 지표 오염물이 대수층까지 유입시키는 결과를 초래하였다. 이에 정부는 지하수법 제6조에 의거 지하수의 체계적이고 합리적인 이용관리를 위하여 1996년 12월 지하수관리 기본계획을 수립하였으며, 그동안의 지하수 환경 등 여건 변화를 고려하여 2002년 12월 지하수관리기본계획을 보완 수립하였으며, 2002년 12월 31일 공고하였다.²⁾

청주시는 지속적인 산업화, 도시화로 인해 용수수요가 급증하여 왔으며, 특히 지하수는 도시지역의 생활용수, 산업화에 따른 공업용수로서 중요 부분을 차지하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이렇게 이용되고 있는 먹는물 및 일상생

활에 사용하고 있는 지하수에 대한 수질을 파악하여 지역별 지하수 특이성을 도출해 내고, 시민에게 맛있고 안전한 물을 공급하게 하며 지하수 오염예방과 오염확산을 방지하기 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

Ⅱ. 조사 및 방법

1. 지하수 일반현황

지하수법에 의하면 지하수는 용도별로 생활용수, 공업용수, 농업·어업용수로 구분된다. 생활용수는 일상적인 가정용 및 가정용에 준하는 목적으로 이용되는 경우로써, 음용수, 농업·어업용수, 공업용수 이외의 모든 용수를 말한다. 공업용수는 수질환경보전법 제2조 제5호의 규정에 의한 폐수배출시설을 설치한 사업장에서 사업활동을 목적으로 이용되는 경우이며, 농업용수는 농업 및 축산업을 영위하기 위하여 사용된다.

청주시는 면적 153,41km², 인구 626,614명(기준: 2005.12.31)이 거주하는 도시로 2005년 집계된 용도별 우물의 개수는 Table 1, 용도별 용수이용현황은^{2),3)} Table 2에 나타내었다.

Table 1. The Number of wells(EA)

Total	Domestic	Industrial	Agricultural	Etc
9,528	5,419	65	6,051	993

Table 2. Utilization status(1000m³/year)

Total	Domestic	Industrial	Agricultural
726,798.7	88,712.8	12,074.1	626,011.8

2. 조사대상 및 시험방법

청주지역 지하수의 수질을 조사하기 위하여 주거지역, 상업지역, 공업지역, 녹지지역으로 나누었다. 각 지역별로 20개 지점을 선정하여 2007년 2월부터 11월까지 계절별로 총 297건의 시료를 채취하였다.

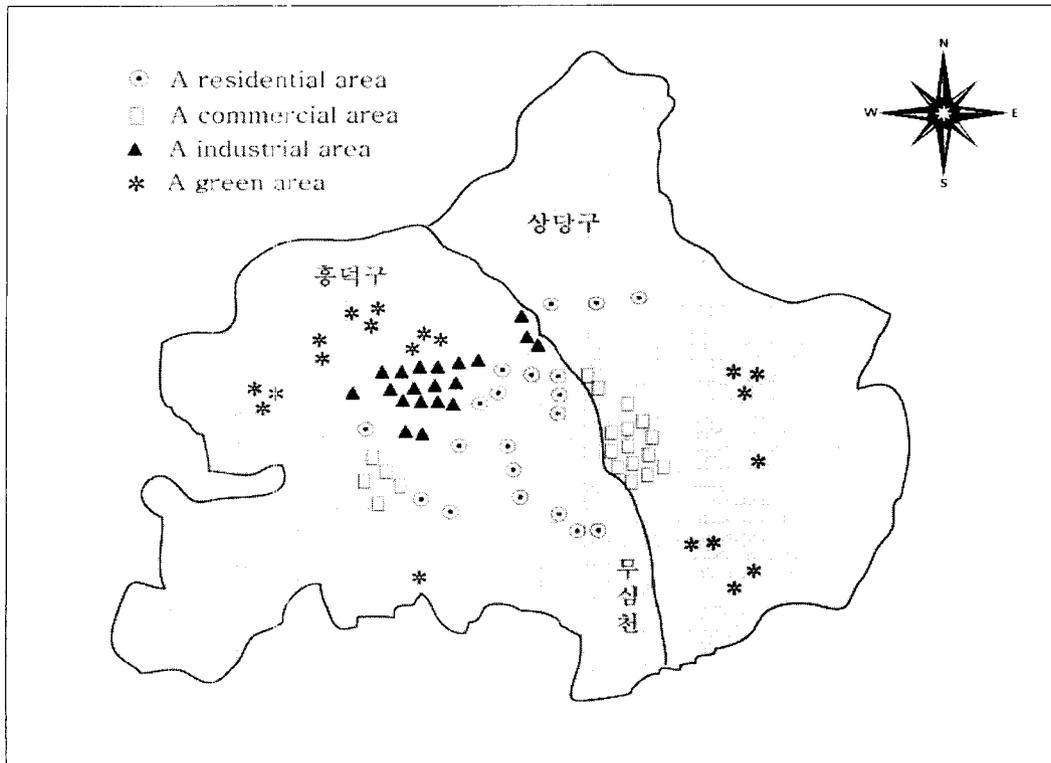


Fig. 1. Sampling sites in Cheongju Area

본 실험은 먹는물 수질공정시험 방법에⁴⁾ 따라 먹는물 수질기준 항목을 대상으로 미생물 검사 항목을 제외한 43개항목과 무기물질인 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 을 분석하였다. 미생물검사 항목은 지질특성 및 지역적인 특성과 무관하고 지하수의 관리차원에서 다루어져야 할 항목이므로 이화학적인 항목을 대상으로 하였으며, 먹는물 수질기준 항목에는 포함되어 있지 않으나 WHO등 선진국에서 음용수의 수질기준으로 관리하고 있는 무기물질인 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 을 추가로 분석하였다.

분석기기는 유도결합플라즈마분광광도계(Thermo Jarrell Ash, ICAP 61E), 이온크로마토그래피(Dionex, ICS-2000), 가스크로마토그래피(Agilent, 6890N), 수은분석기(NIC, RA-3), 분광광도계(PerkinElmer, Lambda 45), 색·탁도계(HACH, 2100AN)등을 사용하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

먹는물 수질기준 항목중 유해영향 무기물질과 유해영향 유기물질(휘발성유기물질과 농약), 심미적 영향물질, 미네랄 등을 주거지역, 상업지역, 공업지역, 녹지지역으로 구분하여 특성을 살펴보았다.

Table 3. Classification of Items

Classification		Items
Harmful inorganic matters		Pb, F ⁻ , As, Se, Hg, CN, Cr ⁶⁺ , NH ₃ -N, NO ₃ -N, Cd, B
Harmful organic matters	Volatile organic compounds (VOCs)	Phenol, 1,1,1-Trichloroethane, Tetrachloroethylene, Trichloroethylene, Dichloromethane, Toluene, Ethyle-Benzene, Xylene, 1,1Dichloroethylene, Carbontetrachloride
	Agrichemicals	Diazinon, Parathion, Fenitrothion, Carbaryl, 1,2-Dibromo-3-Chloropropan
Aesthetic materials		Hardness, KMnO ₄ Consume, Odor, Taste, Cu, Color, ABS, pH, Zn, Cl, Total dissolved solids, Fe, Mn, Turbidity, SO ₄ ²⁻ , Al
Minerals		Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺

1. 주거지역(A residential area)

주거지역에서 선정된 20개지점의 우물의 깊이는 20~150m였고, 양수능력은 30~280ton/day이었다. 계절별로 시료를 채취하여 총 75을 분석한 결과 기준이 내는 50건이었고, 기준초과는 25건이었다. 주로 유해영향 무기물질중 질산성질소의 기준초과율이 가장 높았으며, 심미적 영향물질중 색도, 탁도, 증발잔류물,

아연, 알루미늄 항목이 기준을 초과하였다.

지표수중의 질산성질소 농도는 일반적으로 0.5~2mg/L, 아질산성질소는 0.001~0.01mg/L이다. 일반적으로 얇은 우물은 지표수와 깊은 우물에 비해 비료와 가정하수, 공장폐수 등의 지하침투에 의한 영향을 받기 쉽기 때문에 질산성질소 농도가 높아지는 경우가 있다.

질소는 폐기물, 토양, 공기 중에 $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, 분자질소 등 다양한 형태로 존재하는데, 특히 질산성질소는 대부분 생활하수와 축산관련 부산물의 오염에 의해 생성된다. 질소가 암모늄이온으로 전환되는 과정을 암모니아화라고 하며, 암모늄이온은 양전하를 가지기 때문에 점토에 의해 쉽게 흡착된다. 수중에 존재하는 암모늄이온은 호기성 질산화 미생물에 의한 질산화(nitrification) 과정을 통해 일시적으로 아질산염으로 산화된 후 최종적으로 질산염으로 산화된다. 암모니아화와 질산화는 보통 미생물과 산소가 풍부한 불포화대(unsaturated zone)에서 발생하며, 질산염은 음전하를 가지기 때문에 토양에서 지하수로 쉽게 유출되며 지하수내에서도 유동성이 크다.⁵⁾ 특히 주거 지역에서 다른 항목보다 질산성질소의 기준 초과율이 높은 이유는 좁은 면적에 많은 인구가 밀집되어 거주하고 있어 생활하수 및 오수에 의한 오염물질이 높기 때문일 것으로 사료된다. 지하수 오염 저감을 위해서는 지하수 개발시 그라우팅 및 오염원 차단에 신경을 쓴다면 질산성질소 및 주변으로 인한 오염 정도를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4. Analytic results of groundwater for inorganic matters in the residential areas

Item	Water quality standards	Range of concentration (average)	Frequency of exceeding the standards
Pb (mg/L)	0.05 and below	ND	-
F (mg/L)	1.5 and below	ND~1.5(0.5)	-
As (mg/L)	0.05 and below	ND~0.017(0.01)	-
Se (mg/L)	0.01 and below	ND	-
Hg (mg/L)	0.001 and below	ND	-
CN (mg/L)	0.01 and below	ND	-
Cr ⁶⁺ (mg/L)	0.05 and below	ND	-
NH ₃ -N (mg/L)	0.5 and below	ND~0.02(0.01)	-
NO ₃ -N (mg/L)	10 and below	0.1~23.1(7.1)	7
Cd (mg/L)	0.005 and below	ND	-
B (mg/L)	0.3 and below	ND~0.04(0.02)	-

Table 5. Analytic results of groundwater for organic matters in the residential areas

Item	Water quality standards	Range of concentration (average)
Phenol (mg/L)	0.005 and below	ND
1.1.1-Trichloroethane (mg/L)	0.1 and below	ND
PCE (mg/L)	0.01 and below	ND
TCE (mg/L)	0.03 and below	ND~0.026(0.008)
Dichloromethane (mg/L)	0.02 and below	ND
Benzene (mg/L)	0.01 and below	ND
Toluene (mg/L)	0.7 and below	ND
Ethylbenzene (mg/L)	0.3 and below	ND
Xylene (mg/L)	0.5 and below	ND
1.1-Dichloroethylene (mg/L)	0.03 and below	ND
Carbon tetrachloride (mg/L)	0.002 and below	ND
Diazinon (mg/L)	0.02 and below	ND
Parathion (mg/L)	0.06 and below	ND
Fenitrothion (mg/L)	0.04 and below	ND
Carbaryl (mg/L)	0.07 and below	ND
1,2-Dibromo-3-chloropropane(mg/L)	0.003 and below	ND

Table 6. Analytic results of groundwater for aesthetic materials in the residential areas

Item	Water quality standards	Range of concentration (average)	Frequency of exceeding the standards
pH	5.8~8.5	6.1~8.0(6.8)	-
Hardness (mg/L)	300 and below	66~241(145)	-
KMnO ₄ Consume(mg/L)	10 and below	0.3~0.9(0.33)	-
Cu (mg/L)	1 and below	ND~0.536(0.047)	-
Color (degree)	5 and below	1~58(3.5)	7
Zn (mg/L)	1 and below	0.003~7.301(0.44)	6
Cl ⁻ (mg/L)	250 and below	1~121(34)	-
Total Dissolved Solids (mg/L)	500 and below	88~806(261)	7
Fe (mg/L)	0.3 and below	ND~0.29(0.13)	-
Mn (mg/L)	0.3 and below	ND~0.048(0.014)	-
Turbidity (NTU)	1 and below	0.02~15.5(0.9)	9
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	200 and below	9~65(27)	-
Odor	odorless	suitable	-
Taste	tasteless	suitable	-
ABS (mg/L)	0.5 and below	ND	-
Al (mg/L)	0.2 and below	ND~0.27(0.06)	1

2. 상업지역(A commercial area)

상업지역에서 선정된 20개지점의 우물의 깊이는 15~150m였고, 양수능력은 10~220ton/day이다. 계절별로 시료를 채취하여 총 71건을 분석한 결과 기준이 내는 46건이었고, 기준초과는 25건이었다. 기준초과 항목은 유해영향 무기물질 중 암모니아성질소와 질산성질소였고 심미적 영향물질 중에서는 경도, 색도, 아연, 증발잔류물, 철, 망간, 탁도, 알루미늄 등 이었다. 이 중에서 망간의 초과율이 가장 높았는데 이는 지각 중에서 가장 많이 분포되어 있는 원소중의 하나이며 광물로는 연망간광(MnO₂), 사이로메렌광 등이 있다. 환경중의 분포는 토양에서 200~3,000mg/kg, 해수에서 1.7~5.0μg/L, 하천수에서 8~180μg/L이다. 농도가 0.15mg/L 이상인 물은 불쾌한 맛이 나며, 배관시설이나 세탁물 등을

얼룩지게 한다.⁶⁾ 망간화합물이 용액내에서 산화할때에는 망간이 침전하게 되어 물때가 생성되는 문제가 있다. 약 0.02mg/L의 농도에서도 파이프에 망간의 막이 형성되어 흑색 침전물로 떨어지게 된다.⁷⁾

Table 7. Analytic results of groundwater for inorganic matters in the commercial areas

Item	Water quality standards	Range of concentration (average)	Frequency of exceeding the standards
Pb (mg/L)	0.05 and below	ND	-
F ⁻ (mg/L)	1.5 and below	ND~1.2(0.3)	-
As (mg/L)	0.05 and below	ND~0.013(0.009)	-
Se (mg/L)	0.01 and below	ND~0.01	-
Hg (mg/L)	0.001 and below	ND	-
CN (mg/L)	0.01 and below	ND	-
Cr ⁶⁺ (mg/L)	0.05 and below	ND	-
NH ₃ -N (mg/L)	0.5 and below	ND~5.5(0.8)	8
NO ₃ -N (mg/L)	10 and below	1.1~14.4(5.7)	6
Cd (mg/L)	0.005 and below	ND	-
B (mg/L)	0.3 and below	ND~0.06(0.03)	-

Table 8. Analytic results of groundwater for organic matters in the commercial areas

Item	Water quality standards	Range of concentration (average)
Phenol (mg/L)	0.005 and below	ND
1,1,1-Trichloroethane (mg/L)	0.1 and below	ND
PCE (mg/L)	0.01 and below	ND
TCE (mg/L)	0.03 and below	ND~0.016(0.005)
Dichloromethane (mg/L)	0.02 and below	ND~0.004
Benzene (mg/L)	0.01 and below	ND
Toluene (mg/L)	0.7 and below	ND~0.005
Ethylbenzene (mg/L)	0.3 and below	ND
Xylene (mg/L)	0.5 and below	ND
1,1-Dichloroethylene (mg/L)	0.03 and below	ND
Carbon tetrachloride (mg/L)	0.002 and below	ND
Diazinon (mg/L)	0.02 and below	ND
Parathion (mg/L)	0.06 and below	ND
Fenitrothion (mg/L)	0.04 and below	ND
Carbaryl (mg/L)	0.07 and below	ND
1,2-Dibromo-3-chloropropane(mg/L)	0.003 and below	ND

Table 9. Analytic results of groundwater for aesthetic materials in the commercial areas

Item	Water quality standards	Range of concentration (average)	Frequency of exceeding the standards
pH	5.8~8.5	6.3~7.8(6.8)	-
Hardness (mg/L)	300 and below	23~304(138)	1
KMnO ₄ Consume(mg/L)	10 and below	0.3~7.5(1.3)	-
Cu (mg/L)	1 and below	ND~0.134(0.027)	-
Color (degree)	5 and below	1~53(3.6)	7
Zn (mg/L)	1 and below	0.002~1.979(0.083)	1
Cl ⁻ (mg/L)	250 and below	10~146(47)	-
Total Dissolved Solids (mg/L)	500 and below	32~1160(252)	7
Fe (mg/L)	0.3 and below	ND~0.38(0.12)	1
Mn (mg/L)	0.3 and below	ND~1.968(0.386)	12
Turbidity (NTU)	1 and below	0.02~13.8(0.57)	6
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	200 and below	6~76(30)	-
Odor	odorless	suitable	-
Taste	tasteless	suitable	-
ABS (mg/L)	0.5 and below	ND	1
Al (mg/L)	0.2 and below	ND~0.3(0.06)	-

3. 공업지역(A industrial area)

공업지역에서 선정된 20개 지점의 우물의 깊이는 25~200m였고, 양수능력은 25~616ton/day이었다. 계절별로 시료를 채취하여 총 71건을 분석한 결과 기준 이내는 37건이었고, 기준초과는 34건이었다. 기준초과 항목은 유해영향 무기물질 중 불소와 질산성질소였고 유해영향 유기물질중 테트라클로로에틸렌, 트리클로로에틸렌, 디클로로메탄, 1,1디클로로에틸렌 등이었다. 심미적 영향물질 중에서는 색도, 증발잔류물, 탁도 등이었다.

불소는 특별한 오염원이 없는 경우 화강암과 편마암을 기반암으로 하는 토양에서 유출되는 광물질이며, 환경중의 불소농도는 대기 0.5~3ng/m³이하, 우수

0~0.6mg/L, 해수 1.3~1.4mg/L, 하천수 0.1~0.2mg/L, 지하수 1mg/L이하이다.

특히 다른 지역과는 다르게 유해영향 유기물질중 테트라클로로에틸렌, 트리클로로에틸렌, 디클로로메탄, 1,1디클로로에틸렌 등의 기준 초과율이 높았는데 이 물질들은 각종 산업계에서 널리 사용되는 저비점의 유기할로젠 화합물과 방향환 1개를 갖는 화합물로서 물리화학적 성상, 용도, 사용환경 중에서의 거동이 상당히 유사하다. 오염원인은 휘발성 유기화합물을 사용하는 사업장의 저장시설, 폐기물 처리시설, 배수구 등에서 누출된 것으로 여겨지고 있다. 이러한 물질은 토양중에서 액상의 형태로 토양입자의 간극을 침투하여 토양입자에 흡착됨으로써 아래쪽으로 이동하게 되며, 오염의 확산은 횡방향으로는 적고 주로 종방향으로 이루어진다. 대수층 부근에서 액상으로 존재하고 있는 화합물은 지층의 경사에 따라 이동하며, 물보다 무거워 침강하기 쉬운 화합물은 좁은 범위 내에 잔류하고 물의 용해도에 따라 지하수로 확산된다. 지하수에서의 확산은 주로 토양에서 지하수로 화합물이 침투하여 지하수의 흐름에 따라 변한다. 토양에서의 화합물 공급량이 많고, 지하수의 유속이 빠를수록 오염은 확대되어 농도가 높아진다. 또한 지하수의 흐름에 편승하여 확산되기 때문에 오염은 멀리까지 퍼지게 된다. 일반적으로 휘발성 유기화합물은 불투수층을 통과하지 않지만 지층의 틈이나 관정 등을 통하여 아래쪽으로 침투함으로써 부압대수층 뿐만 아니라 피압대수층의 토양과 지하수에서도 검출된다. 얇은 우물에서는 수위의 변화에 의해 화합물의 농도가 계절적으로 변동하는 경우가 있다. 한편 유기할로젠 화합물은 비중이 매우 크기 때문에 물이 포화상태인 토양에서도 지하수에 침투하여 얇은 우물의 대수층 또는 불투수층을 통과하고 깊은 우물에까지 도달한다. 지하수에 침투한 유기할로젠 화합물은 지하수의 양수상황에 따라 다르지만 수년에서 수십 년까지 오염이 지속되며 장기간 동안 체류하는 것으로 알려지고 있다.⁷⁾

Table 10. Analytic results of groundwater for inorganic matters in the industrial areas

Item	Water quality standards	Range of concentration (average)	Frequency of exceeding the standards
Pb (mg/L)	0.05 and below	ND	-
F ⁻ (mg/L)	1.5 and below	ND~2.3(0.6)	7
As (mg/L)	0.05 and below	ND	-
Se (mg/L)	0.01 and below	ND	-
Hg (mg/L)	0.001 and below	ND	-
CN (mg/L)	0.01 and below	ND	-
Cr ⁶⁺ (mg/L)	0.05 and below	ND~0.04	-
NH ₃ -N (mg/L)	0.5 and below	ND~0.37(0.07)	-
NO ₃ -N (mg/L)	10 and below	0.2~14.9(4.5)	9
Cd (mg/L)	0.005 and below	ND	-
B (mg/L)	0.3 and below	ND~0.09(0.02)	-

Table 11. Analytic results of groundwater for organic matters in the industrial areas

Item	Water quality standards	Range of concentration (average)	Frequency of exceeding the standards
Phenol (mg/L)	0.005 and below	ND	-
1,1,1-Trichloroethane (mg/L)	0.1 and below	ND~0.081(0.02)	-
PCE (mg/L)	0.01 and below	ND~0.028(0.006)	3
TCE (mg/L)	0.03 and below	ND~0.29(0.028)	8
Dichloromethane (mg/L)	0.02 and below	ND~0.08(0.02)	6
Benzene (mg/L)	0.01 and below	ND	-
Toluene (mg/L)	0.7 and below	ND	-
Ethylbenzene (mg/L)	0.3 and below	ND	-
Xylene (mg/L)	0.5 and below	ND~0.01(0.01)	-
1,1-Dichloroethylene (mg/L)	0.03 and below	ND~0.07(0.018)	5
Carbon tetrachloride (mg/L)	0.002 and below	ND	-
Diazinon (mg/L)	0.02 and below	ND	-
Parathion (mg/L)	0.06 and below	ND	-
Fenitrothion (mg/L)	0.04 and below	ND	-
Carbaryl (mg/L)	0.07 and below	ND	-
1,2-Dibromo-3-chloropropane(mg/L)	0.003 and below	ND	-

Table 12. Analytic results of groundwater for aesthetic materials in the industrial areas

Item	Water quality standards	Range of concentration (average)	Frequency of exceeding the standards
pH	5.8~8.5	6.2~8.1(6.9)	-
Hardness (mg/L)	300 and below	44~241(137)	-
KMnO ₄ Consume(mg/L)	10 and below	0.3~1.8(0.4)	-
Cu (mg/L)	1 and below	ND~0.31(0.033)	-
Color (degree)	5 and below	1~12(1.6)	4
Zn (mg/L)	1 and below	0.002~0.984(0.114)	-
Cl ⁻ (mg/L)	250 and below	1~91(31)	-
Total Dissolved Solids (mg/L)	500 and below	54~678(244)	4
Fe (mg/L)	0.3 and below	ND~0.27(0.13)	-
Mn (mg/L)	0.3 and below	ND~0.27(0.045)	-
Turbidity (NTU)	1 and below	0.02~3.27(0.3)	5
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	200 and below	5~83(22.9)	-
Odor	odorless	suitable	-
Taste	tasteless	suitable	-
ABS (mg/L)	0.5 and below	ND	-
Al (mg/L)	0.2 and below	ND	-

4. 녹지지역(A green area)

녹지지역에서 선정된 20개 지점의 우물의 깊이는 20~50m였고, 양수능력은 25~98ton/day이었다. 계절별로 시료를 채취하여 총 81건을 분석한 결과 기준 이내는 43건이었고, 기준초과는 38건이었다. 녹지지역은 유해영향 무기물질 중 질산성질소의 기준 초과율이 다른 항목에 비해 아주 높게 나타났다. 주거지역과 마찬가지로 질산성질소의 기준 초과율이 높은 이유는 지하수 관정의 깊이가 평균 20m 내외로 낮고, 인근의 축산농가 및 비료 과다사용 등의 영향인 것으로 판단된다.

Table 13. Analytic results of groundwater for inorganic matters in the green areas

Item	Water quality standards	Range of concentration (average)	Frequency of exceeding the standards
Pb (mg/L)	0.05 and below	ND	-
F ⁻ (mg/L)	1.5 and below	ND~2.8(0.5)	4
As (mg/L)	0.05 and below	ND	-
Se (mg/L)	0.01 and below	ND	-
Hg (mg/L)	0.001 and below	ND	-
CN (mg/L)	0.01 and below	ND	-
Cr ⁶⁺ (mg/L)	0.05 and below	ND	-
NH ₃ -N (mg/L)	0.5 and below	ND~0.05(0.02)	-
NO ₃ -N (mg/L)	10 and below	1.1~45.8(11)	35
Cd (mg/L)	0.005 and below	ND	-
B (mg/L)	0.3 and below	ND~0.02(0.01)	-

Table 14. Analytic results of groundwater for organic matters in the green areas

Item	Water quality standards	Range of concentration (average)
Phenol (mg/L)	0.005 and below	ND
1.1.1-Trichloroethane (mg/L)	0.1 and below	ND
PCE (mg/L)	0.01 and below	ND
TCE (mg/L)	0.03 and below	ND~0.004(0.003)
Dichloromethane (mg/L)	0.02 and below	ND~0.007(0.003)
Benzene (mg/L)	0.01 and below	ND~0.01(0.01)
Toluene (mg/L)	0.7 and below	ND
Ethylbenzene (mg/L)	0.3 and below	ND
Xylene (mg/L)	0.5 and below	ND
1.1-Dichloroethylene (mg/L)	0.03 and below	ND
Carbon tetrachloride (mg/L)	0.002 and below	ND
Diazinon (mg/L)	0.02 and below	ND
Parathion (mg/L)	0.06 and below	ND
Fenitrothion (mg/L)	0.04 and below	ND
Carbaryl (mg/L)	0.07 and below	ND
1,2-Dibromo-3-chloropropane(mg/L)	0.003 and below	ND

Table 15. Analytic results of groundwater for aesthetic materials in the green areas

Item	Water quality standards	Range of concentration (average)	Frequency of exceeding the standards
pH	5.8~8.5	5.4~7.9(6.5)	1
Hardness (mg/L)	300 and below	27~221(108)	-
KMnO ₄ Consume(mg/L)	10 and below	0.3~3.4(0.5)	-
Cu (mg/L)	1 and below	ND~0.074(0.031)	-
Color (degree)	5 and below	1~18(1.9)	3
Zn (mg/L)	1 and below	0.005~2.937(0.156)	1
Cl ⁻ (mg/L)	250 and below	5~85(26)	-
Total Dissolved Solids (mg/L)	500 and below	36~906(182)	4
Fe (mg/L)	0.3 and below	ND~0.23(0.1)	-
Mn (mg/L)	0.3 and below	ND~0.083(0.024)	-
Turbidity (NTU)	1 and below	0.02~5.63(0.45)	4
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	200 and below	2~53(17.3)	-
Odor	odorless	suitable	-
Taste	tasteless	suitable	-
ABS (mg/L)	0.5 and below	ND	-
Al (mg/L)	0.2 and below	ND~0.14(0.06)	-

5. 미네랄 함유량

일반적으로 자연 상태의 지하수의 용존성분 중 Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻ 등과 같은 주원소의 함량은 대수층을 구성하는 광물의 용해도와 성분비 및 거동특성에 의해 조절된다. 이 중 Na⁺, K⁺, Ca²⁺은 주로 사장석에, Mg²⁺는 각섬석과 흑운모 등에 관련되며, 각 광물의 풍화에 의한 용해도 차이에 따라서 상이한 비율로 용존 성분의 함량에 반영된다.⁸⁾

먹는물 수질기준 항목에는 포함되어 있지 않으나 WHO등 선진국에서 음용수의 수질기준으로 관리하고 있는 무기물질인 Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺에 대하여 함유량 분석 결과를 Table 16과 Fig. 2, 3, 4, 5에 나타냈다.

나트륨은 사람 체중의 0.15~0.2%를 차지하며, 이중 50%는 세포 외액에, 40%는 골격에, 약 10%는 세포내에 존재한다. 주요 생리적 기능으로는 수분 평형을 조절하며 산과 염기의 균형을 유지해주고 정상적인 근육의 자극반응을 조절하여 준다. 나트륨은 칼륨과 함께 알칼리성 금속으로 자연 상태의 지하수에 비교적 많은 양이 용해되어 있고, 보통 그 범위는 10~100mg/L 정도 알려져 있다.⁸⁾ 본 조사결과로 상업지역에서 4.3~108.1mg/L(평균 33.7mg/L)의 분포를 보여 타 지역에 비해 높은 농도를 나타냈는데, 이는 도시 지역에서는 생활하수의 유입을 통하여 공급되는 것으로 사료된다.

칼륨은 칼슘, 인 다음으로 체내에 많이 들어 있는 무기질로 나트륨의 2배정도가 들어 있으며 수분과 전해질 및 산과 염기의 균형을 유지해 주고 근육의 수축, 이완작용과 당질대사 및 단백질 합성에 관여한다. 일반적인 지하수의 칼륨이온 농도는 5mg/L 이하이다.⁹⁾ 본 조사에서는 상업지역 지하수의 칼륨이온 농도가 타 지역에 비해 0.6~55.9mg/L(평균 13.2mg/L)로 훨씬 높고, 기준 초과율도 높았다. 이는 생활하수 등 인위적인 오염원의 영향을 받고 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

지하수중 칼슘과 마그네슘의 기원은 사장석, 각섬석, 휘석, 방해석, 백운석, 석고 등 규산염광물의 용해나 염수에 의한 영향으로 추정되는데, 칼슘은 체내에서는 골격, 치아와 같은 경조직에 99% 존재하고 있다.⁸⁾ 본 조사에서는 칼슘과 마그네슘은 각 지역별로 큰 차이가 없으며, 기준이내의 값을 나타냈다.

Table 16. Concentration of cationic elements in groundwater

Item	Water quality standards in U.K.	Range of concentration in the residential areas (average)	Range of concentration in the commercial areas (average)	Range of concentration in the industrial areas (average)	Range of concentration in the green areas (average)
Na ⁻ (mg/L)	150	11.3~37.6(21.6)	4.2~91.8(32.3)	4.9~39.4(20.3)	8.6~49.4(19.1)
K ⁺ (mg/L)	12	0.4~3.1(1.2)	0.6~39.8(10.7)	0.2~2.4(1.0)	0.3~5.4(1.4)
Ca ²⁺ (mg/L)	250	12.7~66.1(38.2)	2.4~67.1(33.6)	8.9~71.9(35.4)	5.0~64(28.4)
Mg ²⁺ (mg/L)	50	2.6~19.8(8.0)	0.7~21.5(8.8)	1.4~15.9(6.7)	1.8~14.9(6.5)

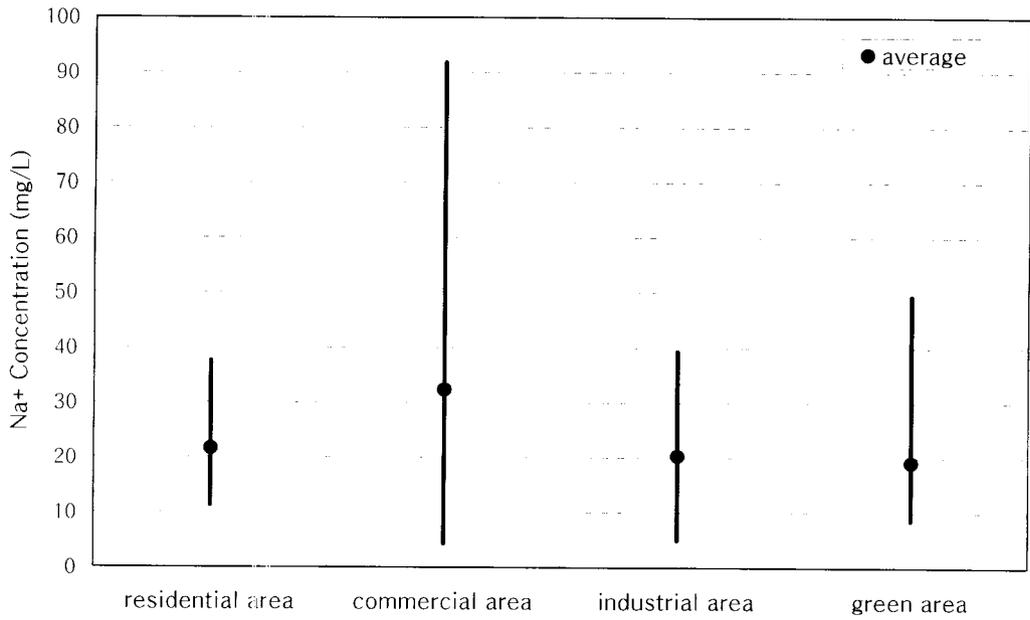


Fig. 2. The distribution of Na⁺ for each area

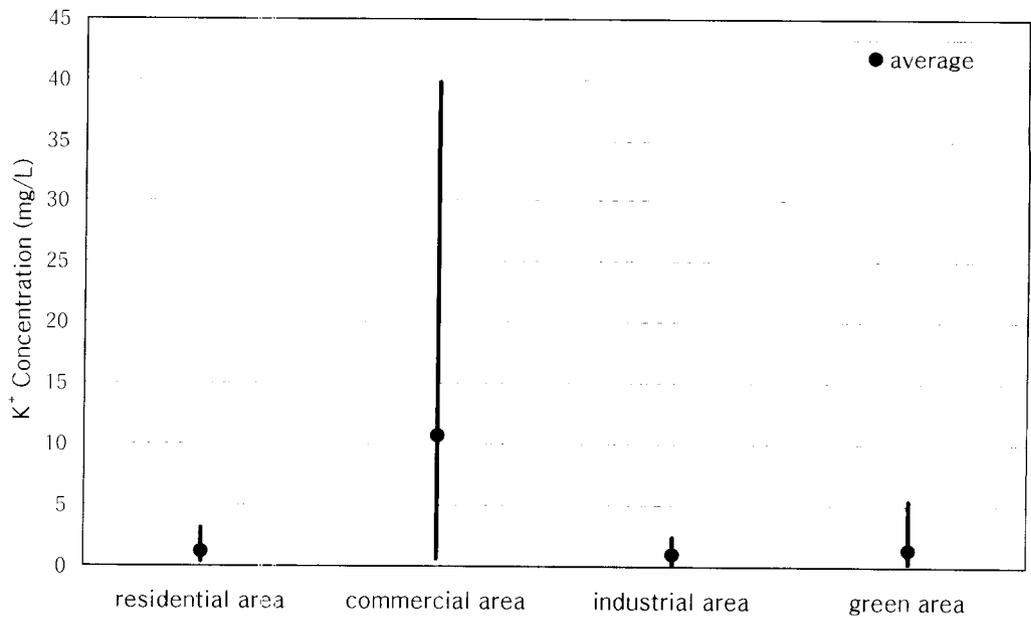


Fig. 3. The distribution of K⁺ for each area

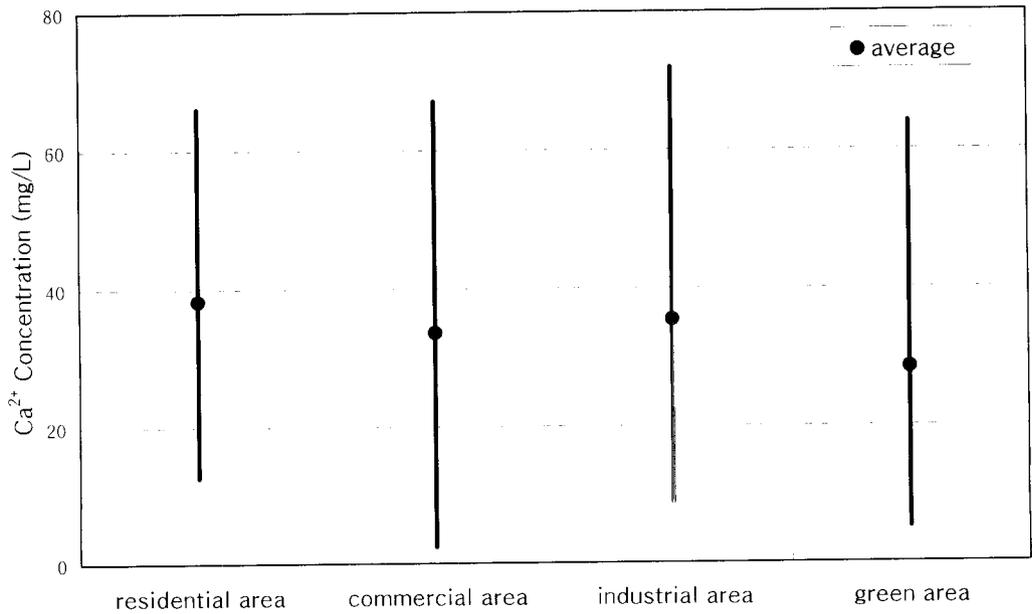


Fig. 4. The distribution of Ca^{2+} for each area

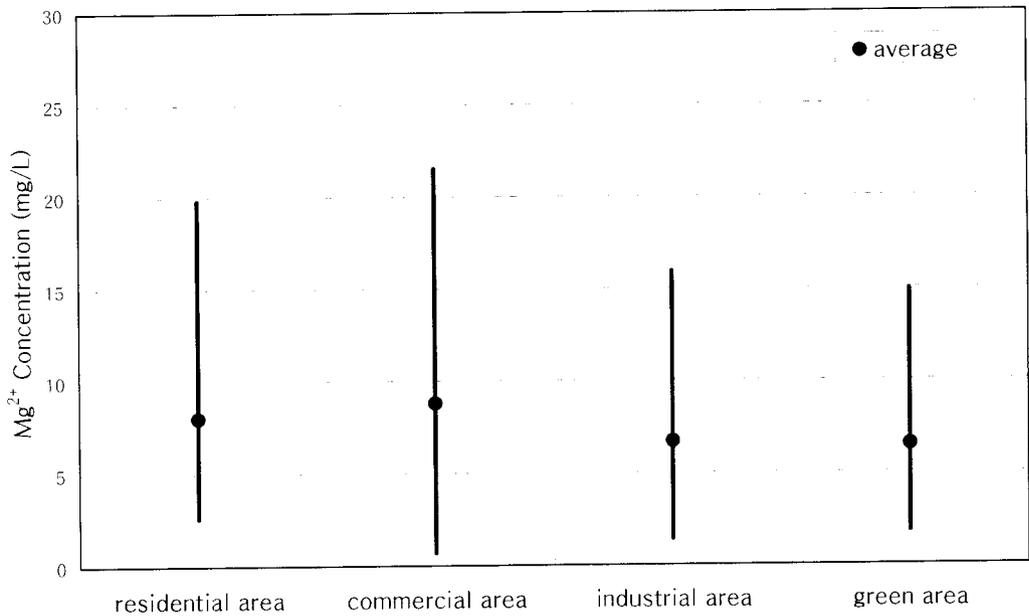


Fig. 5. The distribution of Mg^{2+} for each area

6. 지역별 부적합 항목 비교

주거지역, 상업지역, 공업지역, 녹지지역 등 4개 지역의 수질검사결과 총 47개 검사항목 중 먹는물 수질기준에 의한 부적합은 총 15개의 항목에서 나타났다.

Table 17. Frequency of exceeding the standards for each area

Item	Residential area	Commercial area	Industrial area	Green area
NO ₃ -N	11	6	9	35
Total Dissolved Solids	7	7	4	4
Color	7	7	4	3
Turbidity	9	6	5	4
F	-	-	7	4
Zn	6	1	-	1
Al	1	1	-	-
Mn	-	12	-	-
Fe	-	1	-	-
NH ₃ -N	-	8	-	-
PCE	-	-	3	-
TCE	-	-	8	-
Dichloromethane	-	-	6	-
1,1-Dichloroethylene	-	-	5	-
pH	-	-	-	1
Total	41	49	51	53

Table. 17은 각 지역별로 먹는물 수질기준을 초과한 항목과 초과횟수를 나타낸 것이다. 질산성질소, 증발잔류물, 색도, 탁도 등은 전 지역에 걸쳐 부적합이 나타났고, 불소는 공업지역, 녹지지역에서 나타났으며 아연, 알루미늄은 주거지역, 상업지역에서 나타났다. 또한 망간, 철, 암모니아성질소는 상업지역에서만 부적합이 나타났고, 휘발성유기화합물(VOCs)인 테트라클로로에틸렌, 트리클로로에틸렌, 디클로로메탄, 1,1-디클로로에틸렌은 공업지역에서만 부적합이 나타났다.

Table. 17에 나타난 부적합 항목을 대상으로 각 지역별로 비교분석하여 보았다.
 가. 질산성 질소

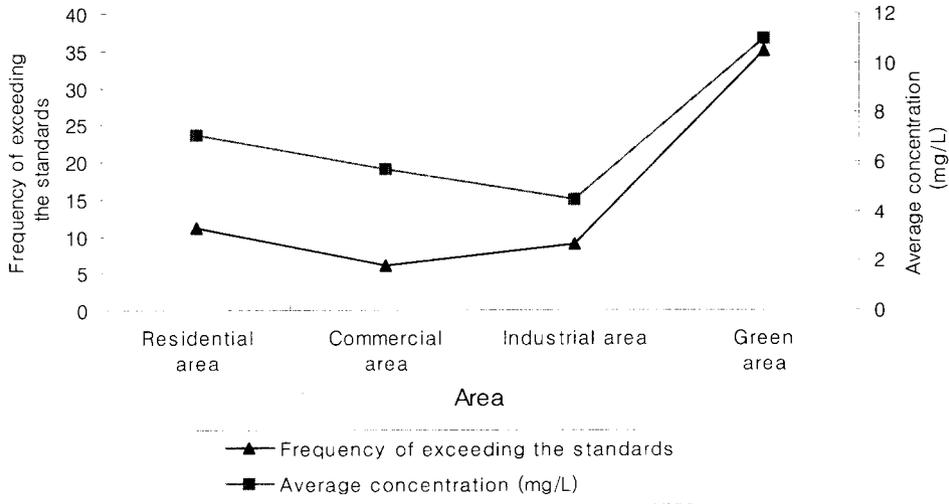


Fig. 6. The distribution of $\text{NO}_3\text{-N}$ for each area

질산성질소는 전체 부적합 항목 중에서 가장 많은 횟수를 보였다. Fig.6는 질산성 질소의 지역별 먹는물 수질기준의 초과횟수와 지역별 질산성질소의 평균 농도를 나타낸 것이다. 그림을 보면 기준 초과횟수와 평균농도가 같은 흐름을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 각 지역별 질산성질소의 평균농도는 공업지역은 4.5mg/L, 상업지역은 5.7mg/L, 주거지역은 7.1mg/L, 녹지지역은 11mg/L 순으로 높게 나타났다. 특히 녹지지역이 타 지역보다 높게 나타났는데, 이는 우리나라에서 질산성질소의 직접적인 오염원인 질산염의 사용처를 보면 알 수 있다. 질산염의 주 용도는 화학비료, 화약, 화학공업에서 산화제나 식품 방부제로 사용된다. 특히 문헌에 의하면 일부 지역에서는 화학비료가 지하수의 질산성질소 생성기여율이 77.6%에 이른다고 한다.¹⁰⁾ 이는 청주지역 대부분의 녹지지역이 논과 밭으로 이루어져 많은 양의 화학비료를 사용하는 것과 일맥을 같이 한다. 여기에 축산농가에서 발생하는 축산폐수 또한 지하수로 유입이 되어 질산성질소를 증가시키는 데 큰 일조를 함으로써 녹지지역의 질산성 질소가 높게 나올 수밖에 없다.

주거지역은 녹지지역보다는 농도가 낮지만 상업지역, 공업지역보다는 높게 나타났는데 이는 사람들에 의한 생활하수와 오수의 유입으로 인해 높게 나온 것으로 추정된다.

나. 증발잔류물, 색도, 탁도

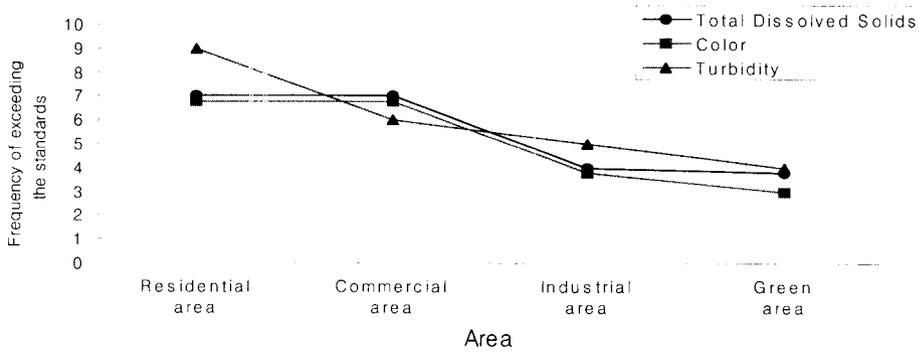


Fig. 7. The distribution of Total Dissolved Solids, Color, Turbidity for each area

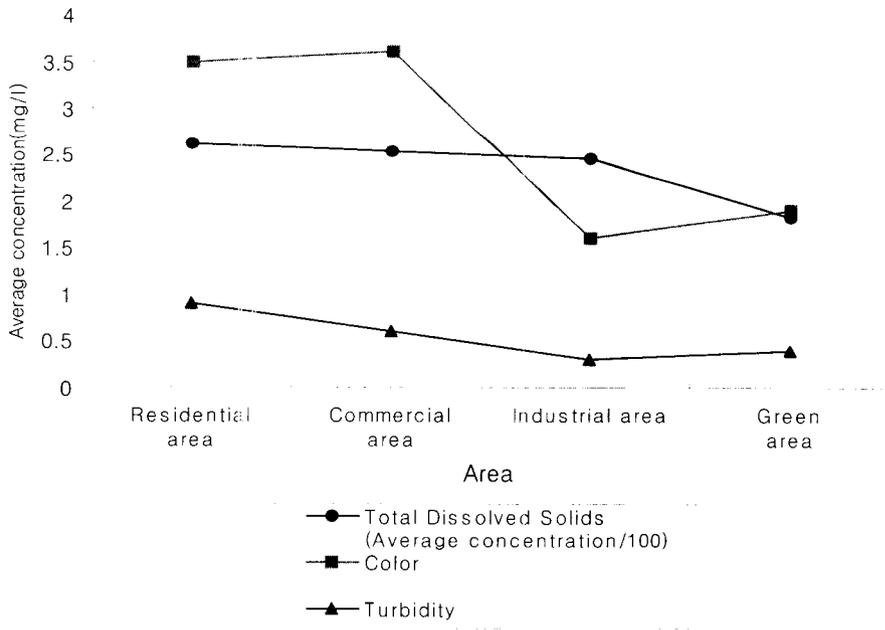


Fig. 8. The concentration of Total Dissolved Solids, Color, Turbidity for each area

Fig.7와 Fig.8은 각 지역별로 증발잔류물, 색도, 탁도의 기준초과횟수와 평균 농도를 그림으로 나타낸 것인데, 같은 흐름을 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 증발잔류물의 평균농도가 높을수록 색도, 탁도의 평균농도도 같이 높아짐을 알 수 있다. 이는 증발잔류물, 색도, 탁도가 서로 상관관계가 높다는 것을 의미한다. 증발잔류물, 색도, 탁도는 주거지역에서 제일 높게 나타났으며 녹지 지역에서 상대적으로 낮게 나타났다. 주거지역에서 높게 나타나는 이유는 인구가 밀집되어 있고 오수 및 생활하수 유입이 많으며 대형건축 및 토목공사로 인하여 지하수 수질에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

다. 불소, 아연, 알루미늄, 망간, 철, 암모니아성 질소

불소는 공업지역, 녹지지역에서 부적합이 많이 나왔고, 아연, 알루미늄은 주거지역, 상업지역에서, 망간, 철은 상업지역에서만 부적합이 나왔다. 특히 아연은 주거지역에서, 망간은 상업지역에 부적합이 많이 나왔다. 지하수중 중금속은 대부분이 지하암반에서 기인하지만 주거지역, 상업지역에서 중금속이 많은 부적합을 보인 것으로 보아 주거 및 상업지역에 거미줄처럼 얽혀있는 금속 재질로 되어있는 상수도관, 하수도관에 의해서도 많은 영향을 받았을 것으로 사료된다. 암모니아성 질소는 상업지역에서만 부적합이 나왔다. 상업지역에는 음식점점, 위락시설 등이 많다. 이는 암모니아성질소의 주범인 생활하수가 유입되기 쉬운 조건을 갖추고 있다는 것을 의미한다.

라. 휘발성 유기화합물(VOCs)

VOCs류인 테트라클로로에틸렌, 트리클로로에틸렌, 디클로로메탄, 1,1-디클로로에틸렌은 공업지역에서만 부적합이 나타났다. VOCs은 각종 화학공업에서 중간원료 또는 용제로 광범위하게 사용되고 있다. VOCs은 휘발성이 커서 대기에 확산되어 지표수 중에는 비교적 적으나 이들 화합물을 함유하는 폐수가 불법으로 방류되거나 지하에 VOCs를 저장하는 탱크나 용기의 누수로 인해 지하수가 오염 되었을 것으로 추정된다.

IV. 결론

2007년 2월부터 11월까지 청주지역을 주거지역, 상업지역, 공업지역, 녹지지역으로 구분하여 각 지역별로 20개지점을 선정하여 계절별로 미생물 검사 항목을 제외한 43개항목과 무기물질인 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 주거지역은 유해영향 무기물질 중 질산성질소와 심미적 영향물질중 색도, 탁도, 증발잔류물의 기준초과율이 높게 나타났다. 특히 다른 항목보다 질산성질소의 기준 초과율이 높은 이유는 좁은 면적에 많은 인구가 밀집되어 거주하고 있어 생활하수 및 오수에 의한 오염물질이 높기 때문일 것이다. 지하수 오염 저감을 위해서는 지하수 개발시 그라우팅 및 오염원 차단에 신경을 쓴다면 질산성질소 및 주변 요인으로 인한 오염 정도를 줄일 수 있을 것이다.
2. 상업지역은 유해영향 무기물질 중 암모니아성질소와 질산성질소, 심미적 영향물질 중에서는 색도, 증발잔류물, 망간 등의 기준 초과율이 다른 항목에 비해 높은 편이었다. 이중에서 망간의 초과율이 가장 높았는데, 망간은 지각 중에서 가장 많이 분포되어 있는 원소중의 하나로 이 지역 암질의 영향으로 기인된 것으로 추정할 수 있다.
3. 공업지역은 유해영향 무기물질 중 불소와 질산성질소, 유해영향 유기물질 중 테트라클로로에틸렌, 트리클로로에틸렌, 디클로로메탄, 1,1디클로로에틸렌 등이 기준초과율이 높았다. 타 지역과 다르게 휘발성 유기화합물의 기준 초과율이 높았는데, 오염원인은 휘발성 유기화합물을 사용하는 사업장의 저장 시설, 폐기물처리시설, 배수구 등에서 누출된 것으로 여겨지고 있다.

4. 녹지지역은 유해영향 무기물질 중 질산성질소의 기준 초과율이 다른 항목에 비해 아주 높게 나타났다. 주거지역과 마찬가지로 질산성질소의 기준 초과율이 높은 이유는 지하수 관정의 깊이가 평균 20m 내외로 낮고, 인근의 축산농가 및 비료 과다사용 등의 영향인 것으로 판단된다.
5. 미네랄 함유량은 나트륨과 칼륨이온의 농도의 경우 상업지역이 타 지역에 비해 높은 농도를 나타냈는데, 이는 생활하수 등 인위적인 오염원의 영향을 받고 있음을 의미한다. 그러나 칼슘과 마그네슘이온의 농도는 각 지역별로 큰 차이가 없었으며, 기준이내의 값을 나타냈다.

참고문헌

1. 한정상, 지하수 환경과 오염, 박영사(2000)
2. 건설교통부·한국수자원공사, 지하수 조사연보(2006)
3. 건설교통부·한국수자원공사·대한광업진흥공사, 청원·청주지역 지하수 기초조사 보고서(2006)
4. 환경부, 먹는물 수질공정시험방법, 환경부 고시 제2004-88호(2004)
5. 손장인, 해수침투에 의한 지하수 오염의 환경지화학적 특성에 관한 연구, 목포대학교 대학원 석사학위논문(2004)
6. 조선형, 고종안, 1999, 지하수 어떻게 할 것인가, (주)복스힐.
7. 환경부, 먹는물 수질관리 지침서(1998)
8. Sidorenko, G.I & Itskova, A.I., 1980, Nickel, Moscow, Medicina.
9. 서정숙 외 3인, 최신 고급 영양학, 323~324(2003)
10. 제주특별자치도, 서부지역 지하구의 질산성질소 오염원 연구(2002)

도내 폐광지역의 중금속 오염에 관한 조사연구

이재호·김창영·권오근·김경미·김덕희·황재석

폐기물분석과

A Study on Pollution of Heavy Metals in Abandoned Mines of Area in Chungcheongbuk-do

J.H.Lee, C.Y.Kim, O.G.Kwon, K.M.Kim, D.H.Kim, J.S.Hwang

Waste Analysis Section

ABSTRACT

This study was conducted to estimate the status of heavy metal contamination in soils(n=39), water samples(n=31) and stream sediments(n=2) in abandoned mines of area in Chungcheongbuk-do. The average level was 5.7 for pH, 0.548mg/kg for Cd, 5.405mg/kg for Cu, 0.823mg/kg for As, 0.139mg/kg for Hg, 12.538mg/kg for Pb, 0.082mg/kg for Cr⁺⁶, 165.933mg/kg for Zn, 23.076mg/kg for Ni, and the others were not detected. Concentration of heavy metals in soil exceeded the standard (agricultural area) of Soil Environment Conservation Law.

I. 서 론

토양을 오염시키는 물질들은 다양하나 이들 중 가장 심각한 오염원은 우리나라 전국에 산재되어 있거나 밀집되어 광산활동을 벌이다가 휴·폐광된 광산이며, 이 광산들은 적절한 환경보호조치 등의 사후대책 없이 방치된 상태로 광미, 폐석, 광산폐수 등에 의해 주변 환경을 오염시키고 있다. 특히 광미는 광산주변에 방치되어 비산되거나 광산 및 주변지역에 매립되어 호우시 유출 또는 황화합물, 물, 공기, 산화박테리아 활동 등으로 광미내 중금속 유출 등의 오염원으로서 주변 토양과 하천을 오염시키고 있다.¹⁾ 우리나라에서 토양에 대한 관심은 70년대 초반부터 시작되었으며, 1995년 토양환경보전법을 제정하여 본격적인 토양오염 지역조사 및 오염토양 정화사업을 추진할 수 있는 종합적인 토양환경 관리의 기본틀을 마련하여 전국적인 규모의 오염방지 관리가 이루어졌으나, 효과적인 수단을 제공하여 토양오염물질의 정화를 적극적으로 유인할 수가 없었다.²⁾ 2002년에 토양환경보전법을 개정하여 오염가능성을 기준으로 가, 나 지역으로 구분하여 우려기준과 대책기준을 설정하였다. “가”지역은 농경지 등의 지역이고 “나”지역은 공장산업지역 등을 말하며, 환경부에서는 2004년부터 2006년까지 687개 광산에 대하여 개황조사를 실시하였다. 지금까지의 폐광지역에 대한 관심과 더불어 폐광지역의 중금속오염에 관한 여러 연구들이 이루어져 왔다.^{3,4,5)} 폐광지역의 생산 광물별로 구분하여 살펴보면, 우리나라에는 금속광산(318개), 석탄광산(379개) 및 비금속광산(1,173개)을 포함하여 총 1,870개소의 광산이 있으며 이중 약 80%가 휴광 또는 폐광된 광산으로 적절한 환경복원 시설이 설치되어 있지 않다. 이중 충청북도에 약 150여개의 폐광산이 산재되어 전국대비 8%를 차지하고 있고 금속광산 주변에는 개발당시 발생되었던 많은 양의 폐석과 광미들로

인해 여러 가지 환경오염 피해가 유발되고 있다. 이에 본 조사연구에서는 토양오염이 우려되는 도내 폐광산 12개를 대상으로 오염원(광미)과 주변토양(밭, 논, 하천퇴적물), 하천수, 지하수 등의 중금속 오염현황을 조사하여 토양오염에 대한 실태 및 특성을 파악하고, 효율적 토양오염 처리 및 복원에 필요한 기초 자료를 제공코자 본 연구사업을 수행하였다.

Ⅱ. 실험재료 및 방법

1. 조사연구 대상지역 선정 및 개요

본 조사연구에서는 2006년 11월경에 도내 12개 시·군에 토양오염이 우려되는 폐광산지역을 관리하는 해당 시·군의 추천을 받아 청주 1개소, 충주 5개소, 제천 5개소, 청원 5개소, 영동 5개소, 옥천 5개소, 보은 1개소, 괴산 3개소, 증평 2개소, 진천 3개소, 음성 3개소, 단양 5개소 등을 1차로 선정하여 자료조사를 위하여 시·군 담당자의 협조를 받아 현장출장하여, 지금까지 광산에 의하여 주변 환경오염이 우려되거나 계속적으로 오염의 우려가 높다고 생각되는 폐광산과 기존에 광해방지사업이 완료된 폐광산을 최종적으로 조사연구 대상으로 선정하였다. 대상광산은 충주 연수동광산, 제천 당두광산, 보은 송평탄광, 옥천 대부광산, 월신(홍우)광산, 영동 월전광산, 괴산 풍산개발, 진천 유창광산, 음성 무극광산, 단양 단양탄광, 봉양탄광, 태화광산 등 12개 광산이다. 그 조사대상물질로 오염원인 광미와 이 오염원에 의해 오염된 주변토양 논토양, 밭토양, 하상퇴적물과 하천수 계곡수 등을 채취하였으며, 또한 환경적으로 이슈화된 괴산 덕평 우라늄 광산을 선정하여 우라늄과 라돈 농도를 조사하였다.

2. 시료채취 방법

시료채취는 토양오염공정시험방법에 준하여 토양 표면의 잡초나 이물질 등을 제거한 후 Fig. 1의 토양 시료채취기로 약 0.5kg을 채취하였다. 채취한 시료는 중금속 분석용 시료의 경우 폴리에틸렌 봉지에 넣어서, 시안, 수분 보정용 시료는 입구가 넓은 200mL 이상 용량의 갈색 유리병에 가득 담고 마개로 막아 밀봉한 후 0~4℃ 냉장상태로 운반하였으며, 채취시 시료명, 위치 내역을 기재 하였다.

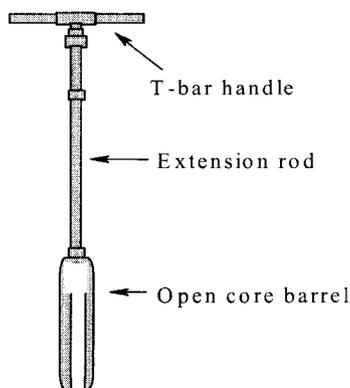


Fig. 1. Hand soil sampler.

3. 실험방법

실험항목은 Cd, Cu, As, Pb, Cr⁺⁶, Ni, Zn, Hg, CN 그리고 수소이온농도 (pH) 등이다. 시안 시험용 시료는 분석 결과에 수분을 보정하기 위해 함수율을 측정하였다. 각각의 분석 항목에 사용된 기기로는 중금속 분석에 유도결합플라즈마발광광도계(Inductively Coupled Plasma Ash, USA), 수은은 수은환원기화법 (Hg analyzer SP-3D, Nippon Instrument Corporation)을 이용하였고 시안 분석은 흡광광도계(VARIAN CARY 300Conc)와 수소이온농도(pH) 분석에는 pH메타 (Orion 920 A+ Thermo Electron Corporation)를 사용하여 분석하였다.

시료의 조제는 각각의 채취 지점에서 채취한 토양시료를 법랑제 또는 폴리에틸렌제 받트(vat) 위에 균일한 두께로 하여 직사광선이 닿지 않는 장소에서 통풍이 잘 되게 헤쳐놓고 풍건시킨 다음, 나무망치로 분쇄하여 분석대상 물질에 따라 비소, 카드뮴, 납, 구리, 6가 크롬 등의 중금속 가용성 함량 분석대상 물질은 눈금간격 2mm의 표준체(10메쉬), 니켈, 아연 등 중금속 전함량 분석대상 물질은 눈금간격 0.15mm(100메쉬)로 체걸음 한 후 시료를 각각 균등량씩 취하여 사용하였다. 시안분석은 채취지점에서 채취한 토양시료에서 돌, 나무 등 협작물을 제거한 후 분석용 시료로 사용하였다. pH 측정은 시료 약 5g을 달아 50mL 비이커에 취하고 증류수 25mL를 넣어 때때로 유리막대로 저어주면서 1시간 방치 후 측정하였다. 중금속 측정을 위해 조제한 시료 10g을 정밀하게 취하여 염산용액 50 mL(0.1N)을 넣고 항온 수평진탕기(100회/분, 진폭 10cm)에서 1시간 진탕한 다음 거름종이(5B)를 이용하여 여과한 후 사용하였다.⁷⁾ 시안분석은 시안증류장치를 사용하였고, 니켈 및 아연분석은 아연전처리장치(C-SH6 Soxhelt Heater Chang Shin Scientific Co)를 사용하여 분석하였다. 우라늄분석은 ICP-MS(DRC-e Perkin Elmer Co)를 이용하여 분석하였고, 라돈분석은 라돈분석기(RAD7 RAD-H₂O DURRIDGE Co)를 사용하여 현장에서 측정하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 채취지점별 수소이온농도의 특성

본 조사연구를 통하여 폐광산 전체 물시료(갱내수, 하천수, 지하수, 간이상수도) 31개와 하천퇴적물 2개소를 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다. Fig. 2에서는 폐광산 갱내수를 나타낸 그림으로서 pH는 2.8-8.4로 나타났으며, 단양 봉양탄광 갱내수가 pH 2.8로 가장 낮게 나타났다. Table 2에서 단양탄광의 하천퇴적물은 pH 6.8로 나타났다. 토양 시료는 39개소를 채취한 결과를 Table 3에 나타내었으며

그 결과 pH 3.3-7.8로 나타났다. 우리나라 전체 토양의 pH 3.6-9.2와^{8,9)} 비교하여 보면 폐광산의 평균 토양은 pH 5.7로 나타났다.

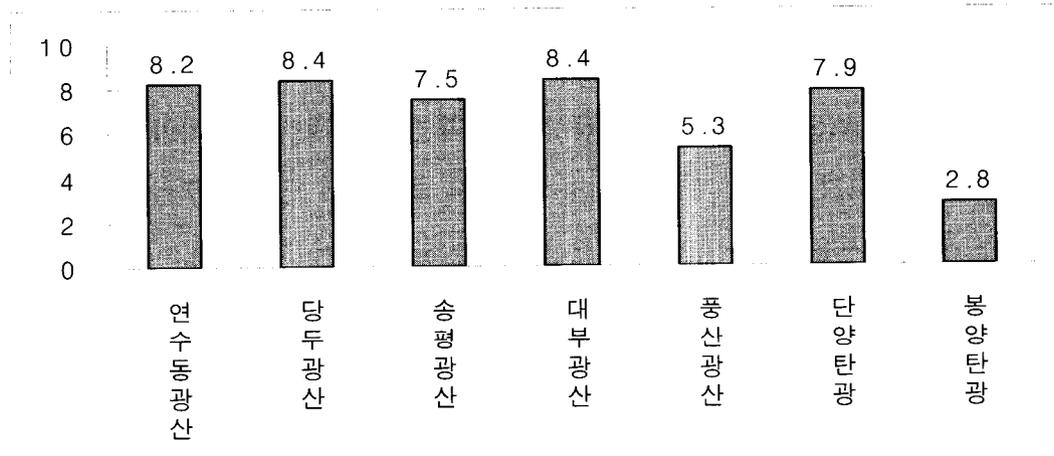


Fig. 2. pH of mine water in abandoned mine.

2. 채취지점별 중금속 농도 분포 및 현황

39개소 토양 분석결과 전체 평균 농도는 수소이온농도(pH) 5.7, 카드뮴 0.548mg/kg, 구리 5.405mg/kg, 비소 0.823mg/kg, 수은 0.139mg/kg, 납 12.538mg/kg, 6가 크롬 0.082mg/kg, 아연 165.933mg/kg, 니켈 23.076mg/kg 으로 나타났으며, 시안은 검출되지않았다. 일반적인 우리나라 배경토양(산림토양) 및 다른나라들의 배경토양 농도는 Table 1과 같으며 본연구 대상지역의 광산 토양시료의 중금속 분포는 Table 1과 같은 농도 이내로 나타났다.

광산별 현황을 살펴보면, 충주시 금릉동에 소재하는 연수동광산은 경도 127:55:56.57, 위도 36:59:42.63(TM좌표 282724.43, 388893.18)에 위치하고 있다.¹⁰⁾ 연수동광산은 충주국립묘원 방향으로 금제1구 마을회관 옆의 저수지를 지나서 0.1km 가면 골프장 위에 광산부지를 확인할 수 있다. 또한, 광산은 지하 240m

깊이에 있으며 통풍구는 지하 70m 지점에 있고 지하 120m 지점부터 시멘트로 폐쇄되어 있다.

Table 1. Total heavy metal concentrations in background soil in various parts of the world.

(unit : mg/kg, dry weight basis)

Item	Pb	Cu	Zn	Cd	As	Cr+6
Korea ¹⁰⁾	6-2,462	2-237	3-1,052	ND-20.0	0.6-29.0	0.1-85
UK ^{11,12)}	16-41	11-323	20-284	<0.3-2.4	4.8-8.6	-
USA ¹¹⁾	<10-700	<1-700	<5-2,900	<0.1-2.9	<0.1-97.0	-
Japan ¹¹⁾	5-189	4-176	10-622	0.03-2.5	0.4-70.0	-
The world ¹¹⁾	2-300	2-250	10-300	0.01-2.4	0.1-50.0	5-1,500

주변에는 과수원이 있으며, 지반침하 현상이 나타나고 있다. 연수동광산의 이력을 살펴보면 철의 생산을 목적으로 한 광산이다. 주민과의 청취조사 결과, 1980년대 초 폐광된 것을 확인할 수 있었다. 현장조사에서 갱구 및 폐시설, 폐건물 등 광산활동 흔적이 확인되었다. 연수동광산의 오염원은 1개소의 폐쇄된 갱구와 사무실 등 폐시설과 폐건축물이 자연방치되어 있으며, 주변환경에 영향을 줄 수 있는 오염원으로 판단된다. 특히 갱내수는 농업용수로 과수원에서 사용중이며, 폐석은 골프장에서 이용 하였고, 선광장시설에서 송어 양식을 하였으나 현재는 폐쇄되어 있다. 시료채취는 갱구 입구에서 펌프로 갱내수(위도 127:55:56 경도 36:59:42)를 채수하였으며, 1번 토양은 갱구 앞의 밭(위도 127:55:56, 경도 36:59:42)이며, 갱입구에서 마을로 내려와 골프연습장 옆 집에서 수질오염공정시험법에 준하여 지하수(위도 127:55:53, 경도 36:59:40)를 채수하고, 갱입구에서 300m 정도 떨어진 논에서 2번 토양(위도 127:55:49, 경도 36:59:40)을 채취하였다. 마을 굴다리를 지나 시청방향으로 약수터 앞 논으로 갱구에서 약 1.3km정도 떨어진 곳에서 토양 3번(위도 127:55:42, 경도 36:59:28)을 채취하였다. 오염도를 분석한 결과는 Table 2와 같으며 결과를 살펴보면 연수동광산 지하 갱내수 pH는 8.2로

약 알카리성으로 나타났고, 아연이 0.511mg/L로 나타났다. 지하수에서는 구리 0.042mg/L, 아연 0.154mg/L으로 특이한 사항은 발견되지 않았으며, Table 4에서 기준들과 비교하여 보면, 모두 지하수(생활용수) 수질기준을 만족한 것으로 나타났다.

Table 2. Heavy meatal concentrations in abandoned mines of area in Chungcheongbuk-do(water).

시 료 명	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr ⁺⁶	Ni	Zn	CN	PH
충주 연수동광산 갯내수	ND	0.020	ND	ND	ND	ND	ND	0.511	ND	8.2
충주 연수동광산 지하수	ND	0.042	ND	ND	ND	ND	ND	0.154	ND	8.4
제천 당두광산 갯내수	0.014	0.027	ND	ND	ND	ND	ND	1.058	ND	8.4
제천 당두광산 하천수	ND	0.017	ND	ND	ND	ND	ND	0.335	ND	8.5
제천 당두광산 지하수	ND	0.019	ND	ND	ND	ND	ND	0.266	ND	8.4
보은 송평광산 갯내수	0.036	0.253	ND	ND	ND	ND	ND	3.245	ND	7.5
보은 송평광산 하천수	ND	0.014	ND	ND	ND	ND	ND	0.204	ND	4.2
보은 송평광산 사방댐	0.053	0.203	ND	ND	ND	ND	0.808	4.507	ND	4.4
옥천 대부광산 갯내수	ND	0.014	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	8.4
옥천 대부광산 하천수 1	ND	0.016	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	8.6
옥천 대부광산 하천수 2	ND	0.016	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	8.4
옥천 대부광산 지하수 1	ND	0.016	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	8.2
옥천 대부광산 지하수 2	ND	0.008	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	7.9
옥천 월산광산 하천수 1	ND	0.011	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	8.3
옥천 월산광산 하천수 2	ND	0.011	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	7.0
옥천 월산광산 지하수	ND	0.009	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6.5
영동 월전광산 지하수	ND	0.016	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	8.4
영동 월전광산 하천수	ND	0.010	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	7.9
진천 유창광산 간이상수도	ND	0.010	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	7.8
진천 유창광산 갯내수	0.072	0.019	ND	ND	ND	ND	ND	4.021	ND	7.5
진천 유창광산 하천수	0.005	0.018	ND	ND	ND	ND	ND	0.495	ND	8.4
괴산 풍산광산 갯내수	0.010	0.180	ND	ND	ND	ND	ND	0.765	ND	5.3
괴산 풍산광산 지하수	ND	0.025	0.124	ND	ND	ND	ND	0.292	ND	7.7
괴산 풍산광산 하천수	ND	0.016	ND	ND	ND	ND	ND	0.082	ND	7.1
단양 단양탄광 갯내수	0.006	0.071	ND	ND	ND	0.008	ND	0.229	ND	7.9
단양 단양탄광 하상퇴적물	0.442	0.194	ND	ND	0.164	0.015	0.900	10.540	ND	6.8
단양 단양탄광 지하수	ND	0.018	ND	ND	ND	ND	ND	1.194	ND	7.5
단양 봉양탄광 갯내수	0.004	0.039	ND	ND	ND	ND	ND	0.809	ND	2.8
단양 봉양탄광 하천수	ND	0.014	ND	ND	ND	ND	ND	0.188	ND	5.0
단양 봉양탄광 간이상수도	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	5.9
단양 봉양탄광 하상퇴적물	ND	0.020	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6.6
단양 태화광산 하천수	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6.6
단양 태화광산 간이상수도	ND	0.015	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6.8

Table 3. Heavy meatal concentrations in abandoned mines of area in Chungcheongbuk-do(Soil).

시 료 명	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr+ 6	Ni	Zn	CN	PH
충주 연수동광산 토양1	0.123	5.353	1.196	0.084	3.403	0.077	10.428	96.864	ND	6.7
충주 연수동광산 토양2	0.124	5.041	0.897	0.456	1.464	0.102	13.282	52.447	ND	6.3
충주 연수동광산 토양3	0.156	3.878	0.957	0.261	4.241	0.053	10.473	68.458	ND	5.7
제천 당두광산 토양1	5.049	17.942	0.621	0.085	5.778	0.060	26.672	1191.901	ND	6.5
제천 당두광산 토양2	0.875	4.013	0.552	0.011	0.574	0.049	25.251	206.885	ND	6.7
제천 당두광산 토양3	4.683	5.546	2.441	0.009	17.327	0.106	15.711	660.324	ND	7.0
보은 송평광산 토양1	0.367	6.458	2.777	0.098	0.645	0.332	107.400	262.471	ND	3.5
보은 송평광산 토양2	0.215	0.625	1.328	0.013	0.261	0.087	30.858	113.215	ND	6.1
보은 송평광산 토양3	0.093	1.792	0.744	0.030	1.325	0.063	149.111	458.731	ND	5.2
옥천 대부광산 토양1	0.089	1.702	0.656	0.029	1.059	0.045	17.859	51.143	ND	6.2
옥천 대부광산 토양2	0.255	10.842	0.658	0.123	9.650	0.141	22.969	68.076	ND	5.8
옥천 대부광산 토양3	0.306	5.857	0.665	0.061	5.581	0.073	18.779	65.828	ND	5.3
옥천 대부광산 토양4	0.265	8.873	0.695	0.102	5.153	0.127	23.832	78.613	ND	6.3
옥천 대부광산 토양5	0.398	6.357	0.751	0.095	10.451	0.125	19.492	66.299	ND	5.2
옥천 월산광산 토양1	1.214	3.996	0.355	0.050	30.218	0.013	10.511	269.877	ND	5.2
옥천 월산광산 토양2	0.823	6.898	0.754	0.037	40.097	0.064	12.909	240.810	ND	5.3
옥천 월산광산 토양3	0.467	6.853	0.817	0.047	16.491	0.098	12.186	140.075	ND	5.2
옥천 월산광산 토양4	0.466	3.697	0.690	0.058	20.700	0.073	10.306	231.479	ND	5.7
옥천 월산광산 토양5	0.617	7.550	0.729	0.029	23.084	0.116	10.230	186.227	ND	6.1
옥천 월산광산 토양6	0.468	7.937	0.783	0.034	17.234	0.091	10.295	118.125	ND	5.7
영동 월전광산 토양1	0.941	25.744	0.416	0.264	1.404	0.053	4.768	27.522	ND	3.3
영동 월전광산 토양2	0.224	13.966	0.868	3.070	44.084	0.406	15.107	105.013	ND	5.8
진천 유창광산 토양1	0.290	0.899	0.855	0.043	36.675	0.014	7.554	108.717	ND	5.2
진천 유창광산 토양2	0.714	4.175	1.497	0.024	26.181	0.161	30.298	274.492	ND	5.6
괴산 풍산광산 토양1	0.188	3.598	0.675	0.006	23.840	0.057	26.991	152.686	ND	6.7
괴산 풍산광산 토양2	0.359	2.493	0.927	0.021	23.749	ND	15.450	63.708	ND	6.6
괴산 풍산광산 토양3	0.247	5.234	0.794	0.004	10.996	0.141	8.698	100.392	ND	6.7
음성 무극광산 토양1	0.216	6.451	1.381	0.089	45.297	0.114	11.294	148.493	ND	7.8
음성 무극광산 토양2	0.087	0.699	0.836	0.001	1.807	0.047	35.463	157.262	ND	6.8
음성 무극광산 토양3	0.156	4.404	0.578	0.008	7.195	0.057	14.138	51.837	ND	5.9
단양 단양탄광 토양1	0.052	1.971	0.166	0.012	10.447	0.018	7.764	101.827	ND	4.0
단양 단양탄광 토양2	0.123	2.093	0.680	0.027	1.102	0.041	39.007	136.984	ND	5.7
단양 단양탄광 토양3	0.250	0.783	0.490	0.005	0.272	0.013	25.843	106.451	ND	6.4
단양 단양탄광 토양4	0.008	0.463	0.314	0.012	ND	ND	25.317	53.065	ND	7.0
단양 봉양탄광 토양1	0.088	0.562	0.520	0.050	1.741	ND	1.503	ND	ND	4.1
단양 봉양탄광 토양2	0.076	2.120	0.566	0.014	2.863	0.028	21.102	63.730	ND	5.0
단양 태화광산 토양1	0.051	5.452	0.259	0.021	32.094	0.013	9.994	55.822	ND	4.5
단양 태화광산 토양2	0.155	4.256	0.601	0.037	3.296	0.121	20.856	76.711	ND	4.8
단양 태화광산 토양3	0.078	3.385	0.595	0.015	1.242	0.035	20.656	58.834	ND	5.8

Table 4. Water and soil standard of Environment Conservation Law.

구분		분석결과(단위: 수질 mg/L, 토양 mg/kg)										
		pH	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr ⁶⁺	Hg	CN	
수질 분류 기준	먹는물의 수질기준	5.8-8.5	0.05	0.005	1.00	-	0.05	1.00	0.05	0.001	0.01	
	하천수 수질기준	사람의 건강보호기준	-	0.05	0.005	-	-	0.05	-	0.05	불검출	불검출
	지하수 수질 기준	지하수 (생활용수)	5.8-8.5	0.05	0.01	-	-	0.1	-	0.05	불검출	불검출
		지하수 (농업용수)	6.0-8.5	0.05	0.01	-	-	0.1	-	0.05	불검출	불검출
	지하수 (공업용수)	5.0-9.0	0.1	0.02	-	-	0.2	-	0.1	불검출	0.2	
토양 분류 기준	토양오염 우려기준	-	6	1.5	50	40	100	300	4	4	2	
	토양오염 대책기준	-	15	4	125	100	300	700	10	10	5	

토양오염도를 조사하기 위하여 토양오염공정시험법에 준하여 pH, As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg, Cr⁶⁺, CN 등을 분석한 결과를 Table 3에 나타내었으며, 그 결과를 살펴보면 토양중 중금속 성분들은 카드뮴 0.123-0.156mg/kg, 아연 52.447-96.864mg/kg으로 모든 시료에서 토양오염우려기준 이하로 검출되어 광산활동에 의한 직접적인 영향은 낮은 것으로 판단된다.

제천 당두광산은 제천시 금성면 중정리에 소재하며, 지리적 위치는 경도 128:11:32.87, 위도 37:02:50.95(TM좌표 305809.52, 394956.01)에 위치하고 있다. 금성에서 수산방향으로 82번 국도로 가다가 고교를 지나자마자 좌회전하여 배나무밭 마을과 축사를 지나 0.5km정도 가면 바로 길옆에 광산이 위치한다. 광산이력은 등록번호 제 14322호, 제 19600호로 등록되어 있으며 금, 은, 연, 아연 을 생산하기 위한 광산 이었다. 광산부근의 지질은 조선계 대석회암통의

삼태산층과 시대미상의 금수산규암층, 서창리층, 각섬암 및 경상계 불국사통의 화강암, 거정질화강암, 암맥 등으로 구성되며, 광상은 석회암층을 층상교대 또는 층리에 직교하는 열극을 따라 교대한 열수교대광상으로 확인되었다. 갯구는 2개소로 조사되었으며 개방된 상태이고, 폐석은 갯구앞에 소량 쌓여있다. 갯내수는 소량 유출되며, 인접한 밭에 농업용수로 사용하고있다. 그 외 폐시설 및 광미 등은 없는 것으로 조사되었다. 이외에는 주변환경에 영향을 줄 수 있는 오염원은 없는 것으로 확인되었으며, 마을의 상대적 위치는 광산직하부 100m에 해당되는 것으로 조사되었다. 광산활동으로 인한 오염여부를 조사하기 위하여 광산 굴 입구에서 갯내수(위도 128:11:32.87, 경도 37:02:50.95)를 채수하였다. 굴 입구에서 토양 1번(위도 128:11:33, 경도 37:2:50)을 시료채취, 2번 토양(위도 128:11:34, 경도 37:2:58)은 갯구 앞 밭 우측으로 20m 지점이며, 3번 토양(위도 128:11:34, 경도 37:2:58)은 좌측 광산 밑 산쪽에서 채취하였으며, 하천수(위도 128:11:33, 경도 37:2:51)와 마을에서 지하수(위도 128:11:33, 경도 37:3:1)도 채수하였다. 하천수는 대부분 바닥이 건천으로 드러나 있는데, 약간의 유량이 있어서 시료채취를 할 수 있었다. 분석결과 당두광산 갯내수에서 Cd 0.014mg/L, Cu 0.027mg/L, Zn 1.058mg/L, pH 8.4로 나타났으며, 하천수에서 Cd 0.017mg/L로 Table 4에서 나타낸것과 같이 하천수 수질기준 중 사람의 건강보호기준(Cd 0.005mg/L)을 초과한 것으로 나타났다. 이 하천은 평상시 대부분이 건천으로 존재하며, 비가 올경우에만 채수가 가능하고 마을 주민들도 음용하지 않고 있는 실정이다. 지하수에서는 Cu 0.019mg/L, Zn 0.266mg/L로 나타나 지하수(생활용수)의 기준 이내로 나타났다. 토양 시료는 우리나라 토양환경보전법의 토양오염우려기준(농경지역 Cd 1.5, Zn 300mg/kg) 및 대책기준(농경지역 Zn 700mg/kg)과 비교한 결과 당두광산 1번 토양에서 Cd 5.049mg/kg으로 우려기준을 3.4배정도 초과하였고, Zn 1191.901mg/kg으로 우려기준을 4.0배, 대책기준에는 1.7배 초과한 것으로 나타났다. 3번 토양에서

Cd 4.638mg/kg으로 우려기준을 3.1배정도 초과하였고 Zn 660.324mg/kg으로 우려기준을 2.2배 초과한 것으로 나타났다. 1994년 휴·폐광된 금속광산지역의 오염관리대책 최종보고서¹⁰⁾에 따르면, 광산하부의 시료 S1에서 대책기준을 초과하는 카드뮴과 아연이, 시료 S2에서 대책기준을 초과하는 아연과 우려기준을 초과하는 카드뮴이, 시료 S3에서 우려기준을 초과하는 아연이 검출된 바 있다. 오염농도의 최고치는 Cd 16.577mg/kg, Zn 1755.45mg/kg으로 시간의 경과에 의한 중금속의 자연분해로 오염도가 많이 감소된 것으로 나타났으나, 이들 오염물질이 하부의 농경지로의 확산이 우려되므로 정밀조사가 필요하다고 판단된다.

보은 송평광산은 대구광산협회에서 3개월마다 시료채취 후 검사하는 지점으로 2004년 복구가 완료된 석탄광산이다. 갱내수가 많이 흘러나오며, 시료채취는 갱내수(위도 127:37:2, 경도 36:27:29)와 갱미(위도 127:32:2, 경도 36:27:28)를 채취하였으며, 하천수(위도 127:34:4, 경도 36:27:27)는 갱내수와 합류하기 20m 전에서 채수하였다. 갱구하류 200m 지점에 사방댐이 있어 사방댐 물(위도 127: 37:3, 경도 36:27:38)을 채수 하였으며, 댐내 어류는 전혀 보이지 않아 광산으로 인하여 오염된 것으로 판단된다. 2번 토양(위도 127:37:11, 경도 36:27:52)은 갱구 하류 400m 지점 교회 앞 밭에서 채취하였다. 3번 토양(위도 127:37:0, 경도 36:28:9)은 600m 지점 논에서 채취하였다. 분석결과 갱내수에서 Cd 0.036mg/L, Cu 0.253mg/L 와 Zn 3.245mg/L, pH 7.5로 나타났다. 갱내수와 유입전 하천수에서 Cu 0.014mg/L, Zn 0.204mg/L와 pH 4.2로 나타났는데 이는 상류에 있는 석탄광산에 의한 영향으로 판단되며, 하류에 있는 사방댐에서 채수한 물 분석결과 Cd 0.053mg/L, Cu 0.203mg/L, Ni 0.808mg/L, Zn 4.507mg/L으로 하천수 수질기준 중 사람의 건강보호기준(Cd 0.005mg/L)을 10배 초과한 것으로 나타났으며, pH는 4.4로 산성을 띠어 사방댐 내에서는 어류들이 살 수 있는 환경이 아닌 것으로 판단된다. 마을 주민들은 하천에 물고기가 살지 않는다고 주장하고 있는 것과 같이 실제 하천의

현장관찰 결과 어류를 발견하지 못하였다. 이를 종합적으로 판단하여 볼때, 송평광산의 영향으로 판단된다. 토양분석 결과 토양 1번 갱미에서 Ni 107.400mg/kg, pH 3.5로 산성으로 나타났고, 토양 3번 논 토양에서 Ni 149.111mg/kg, Zn 458.731mg/kg으로 토양오염우려기준을 각각 3.7, 1.5배 초과한 것으로 나타났다. 이는 광산활동의 영향에 의한 것으로 판단된다.

옥천군 대부광산은 석탄광산으로 시료채취는 1번 광구에서 갱내수와 토양 1번(위도 127:43:8, 경도 36: 19:27)을 채취하였고, 무너진 광구 2, 3번 밭에서 토양 2번(위도 127:43:3, 경도 36:19:26)을 토양 3번(위도 127:43:5, 경도 36:19:27)은 1번 광구와 2, 3번 광구사이에서 100m하부 밭에서, 4번 토양(위도 127:43:4, 경도 36:19:29)은 1번 광구 좌측으로 150m 지점에서, 5번 토양(위도 127:43:10, 경도 36:19:25)은 우측 150m 지점에서 채취하였다. 하천수 1번(위도 127:43:2, 경도 36:19:29)은 광산에서 200m 떨어진 마을과 합류지점이며, 하천수 2번(위도 127:43:9, 경도 36:19:24)은 광산에서 200m 떨어진 지점이다. 구움2구 경로회관에서 지하수 1번(위도 127:42 56, 경도 36:19:47)과 마을에서 지하수 2번(위도 127:43:2, 경도 36:19:19)을 채수하였다. 대부광산의 갱내수, 하천수, 지하수 분석결과 Cu 0.008-0.016mg/L으로 특이한 사항은 발견되지 않았으며, 토양시료 분석결과 Cd 0.089-0.398mg/kg, pH 5.2-6.3으로 모두 토양오염우려기준 이내로 나타나 광산활동에 의한 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

월신광산은 석탄광산으로 광산 앞의 산에서 토양 1번(위도 127:44:29, 경도 36:19:38), 우측 200m 지점 논에서 토양 2번(위도 127:44:30, 경도 36:19:42), 광산 정면 100m지점에서 논에서 토양 3번(위도 127:44:21, 경도 36:19:42), 좌측 150m 지점 논에서 토양 4번(위도 127: 44:24, 경도 36:19:39), 정면 우측 300m 지점에서 밭에서 토양 5번(위도 127:44:25, 경도 36:19:44), 정면 좌측 400m 지점 밭에서 토양 6번(위도 127:44:19, 경도 36:19:38)의 시료채취를 하였으며, 광산 우측 300m 지점에서 하천수 1번(위도 127:44:30, 경도 36:19:45), 정면 150m 지점에서 하천수 2번(위도 127:44:25, 경도 36:19:40), 그리고 벼농사에 사용하는 농업용수

지하수(위도 127:44:21, 경도 36:19:42)시료를 채수하였다. 갯내수는 비가 내려야만 채취 가능하므로 채수하지 못하였으며, 하천수 와 농업용수로 사용하는 지하수에서 Cu의 농도가 0.009-0.011mg/L으로 나타나 특이한 사항은 발견하지 못하였다. 토양 6개 시료분석 결과 Cd는 0.466-1.214mg/kg, Zn은 118.125-269.877 mg/kg, pH 5.2-6.1로 모두 토양오염우려기준 이내로 나타났다.

영동 월전광산은 금광으로 갯입구에서 토양 1번(위도 127:46:53, 경도 36:0:52)과 밭에서 2번 토양(위도 127:46:56, 경도 36:0:50) 그리고 지하수(위도 127:46:56, 경도 36:0:49)와, 하천수(위도 127:46:56, 경도 36:0:49)를 채수하였다. 지하수와 하천수 분석결과 특이한 사항은 나타나지 않았고, 토양 2번에서 Hg 3.070mg/kg으로 다소 높게 나타나 광산 활동의 영향으로 판단되며, 중금속 항목 모두 토양오염우려기준 이내로 나타났다.

진천 유창광산은 광산 입구 5m 지점의 밭에서 1번 토양(위도 127:29:8, 경도 36:49:42), 100m 떨어진 마을 콩밭에서 2번토양(위도 127:29:11.5, 경도 36:49:43. 2), 50m 떨어진 민가에서 간이상수도와 갯내수(위도 127:29:10, 경도 36:49:42), 150m 떨어진 지점에서 하천수(위도 127:29:17.1, 경도 36:49:47.7)를 채수하였다. 유창광산은 완전복구가 이루어진 광산으로 마을간이상수도 분석결과 먹는물의 수질기준 이내로 나타났고 갯내수에서 아연이 4.021mg/L로 나타났다. 토양 시료 분석결과 Zn 274.492mg/kg으로 모두 토양오염우려기준 이내로 나타났다.

괴산군 풍산광산은 광해방지사업이 완료된 광산으로 갯내수 집수시설에서 갯내수(위도 127:58:8, 경도 36:48:59)를 채수하였으며, 갯구 앞 5m 지점 밭에서 1번 토양(위도 127:58:8, 경도 36:48:59), 하천넘어 광산에서 20m 정도 떨어진 밭에서 2번 토양(위도 127:58:8, 경도 36:49:0), 100m 떨어진 밭에서 3번 토양(위도 127:58:6, 경도 36:49:1)을 채취하였고, 50m 떨어진 집에서 지하수(위도 127:58:8, 경도 36:49:0)와 하천수(위도 127:58:8, 경도 36: 49:0)를 채수하였다. 분석결과 마을주민이 생활용수로 사용하고 있는 지하수는 As가 0.124mg/L로

지하수(생활용수) 수질기준(As 0.05mg/L)을 초과한 것으로 나타났고, 토양 분석 결과는 모두 토양오염우려기준 이내로 나타났다.

음성 무극광산은 우리나라 대표적인 금광으로 음성군 금왕면 용계리에 소재하며, 지리적 위치는 경도 127:35:28.59, 위도 36:58:29.29(TM좌표 252384.40, 386390.59)이다. 무극광산은 금왕에서 맹동면 방향 21번 국도를 이용, 공설운동장을 지나 영풍아파트 맞은편 영풍산업에 위치하였으나 현재는 완전 복구되고 레미콘회사 부지로 바뀌어 있다. 광산이력을 살펴보면 광구지적상 음성지적 제 71호, 81호, 82호, 91호, 92호, 93호, 101호, 102호, 103호, 112호, 및 113호(등록번호 제 53호, 438호, 560호, 14290호, 17038호, 14425호, 9604호)로 등록되어 있으며, 금과 은을 생산하기위한 광산이다. 광산의 광업권은 1909년에 등록되었으며, 2002년 광업권이 소멸되었고, 최종광업권자는 영풍산업(주)으로 확인되었다. 광산부근의 지질은 주로 화강편마암, 규장암, 흑운모화강암이며, 광상은 열극충진합금석영맥으로 확인되었다. 무극광산의 경우, 갱구는 12개소가 있었으며 현재 폐쇄되었다. 영풍산업(주)이 공장으로 사용하기 위해 광산 자리를 복토해 광산개발 당시의 흔적은 전부 매몰된 상태로 갱구, 폐석, 광미와 선광장시설 등은 확인할 수 없었으며 현재는 레미콘 회사로 바뀌어 있는 상태이다. 광산하부 50m에 마을이 위치하며 식수는 상수도를 사용하고 있다. 완전매립 복구되어 주변 토양을 채취하였다. 회사 경비소 앞 주유소 예정으로 복토되어 있는 공터에서 1번 토양(위도 127:35:26, 경도 36:58:29), 회사 담 뒤편 10m 지점 밭에서 2번 토양(위도 127:35:21, 경도 36:58:22), 100m 떨어진 논 3번 토양(위도 127:35:19, 경도 36:58:9)을 채취하였다. 갱내수, 하천수 및 지하수 등은 시료채취를 하지 못하였다. 토양분석결과 Cd 0.087-0.216mg/L, Zn 51.837-148.493mg/L, pH 5.9-7.8로 모두 토양오염우려기준 이내로 나타났다. 1994년 개황조사에서는 모두 토양오염우려기준 이내로 나타났다. 또한, 무극광산은 광산개발의 흔적이 남아있지 않아 특별한 오염원이 없어 토양 및 수계에 영향을 미치지 않을것으로 판단된다.

단양군 단양탄광은 2000. 8. 17 - 2001. 6. 19 석탄산업합리화사업단을 시행자로 단양산림조합이 시공자로 복구가 이루어져 있다. 광미(위도 128:21:6, 경도 36: 56:40) 광산 앞 10m 떨어진 밭에서 1번 토양(위도 128:20:51, 경도 36:56:27), 도로건너 밭에서 2번 토양(위도 128:20:51, 경도 36:56:27), 광산 하류지점 300m에 위치한 곳에서 갯내수가 흘러나오는곳이 있는데 이지점 옆의 밭에서 3번 토양(위도 128:20:37, 경도 36:56:32)과, 갯내수(위도 128:20: 37, 경도 36:56:32)를 채수하였다. 또한 붉은색의 하천퇴적물(위도 128:20:37, 경도 36:56:32)과, 광산에서 600m 정도 떨어진 마을 입구에서 지하수(위도 128:20:22, 경도 36:56:32)를 채수하여 분석하였다. 마을 주민들에세 식수로 이용하는 지하수에서 Cu 0.018mg/L, Zn 1.194mg/L로 먹는물의 수질기준 Zn 1.00mg/L을 약간 초과한 것으로 나타났다.

갯내수에서 Zn 0.229mg/L, Fe 68.550mg/L으로 나타났고 하천퇴적물에서 Zn 10.540mg/L와 Fe 71,040mg/L으로 나타나 붉은색의 원인인 황화현상이 나타났다. 황화현상의 주성분 분석을 위하여 기존 연구사업 10항목 외 철 성분을 분석하였다. 토양 시료분석 결과 Cu 0.052-0.250mg/kg, Zn 101.827-136.984mg/kg으로 모두 토양오염우려기준 이내로 나타났다.

봉양탄광은 과수원을 지나 산 정상부근에 위치하며 갯내수(위도 128:17:7, 경도36:53:10)와, 광미(위도 128:17:7, 경도 36:53:10), 200m 떨어진 과수원에서 1번 토양(위도 128:17:27.3, 경도 36:53:13.0), 500m 떨어진 산 밑에서 흐르는 하천수(위도 128:17:24, 경도 36:53:24)와, 하천퇴적물(위도 128:17:24, 경도 36:53:24) 그리고 산밑 마을 회산리에서 간이상수도(위도 128:17:46.4, 경도 36:53:21.9)를 채수하였다. 갯내수에서 Cd 0.004mg/L, Cu 0.039mg/L, Zn 0.890mg/L, Al 15.950mg/L, pH 2.8로 나타났다. 특이사항으로 산밑 하천수가 갯내수와 하천수가 합류하여 갈수기에 하천 바닥에 흰색 침천물이 많이 보이는 데 이것은 알루미늄이 주성분으로 백화현상을 나타내는 것으로 판단된다. 회산리 간이상수도 분석결과 먹는물 수질기준 이내로 나타났고, 토양 시료분석 결과 모두 토양오염우려기준 이내로 나타났다.

태화광산은 34년 전에 폐광된 석탄광산으로 산 정상에 위치하며, 광미(위도 128:29: 15.4, 경도 37:5:57.0)를 채취하였고, 300m 정도 떨어진 산 밑 마을 밭에서 토양 1번 (위도 128: 29:47.1, 경도 37:6:0.8), 하천수와 간이상수도(위도 128:29:47.1, 경도 37:6:0.8)를 채수하였고, 1.5Km 정도 떨어진 마을입구 밭에서 2번 토양(위도 128:30:31.7, 경도 37:5:47.7)을 채취하였다. 물시료 분석결과 간이상수도에서 Cu의 농도는 0.015mg/L로 나타났으며, 토양시료 분석결과 Cu 0.051-0.155mg/kg로 나타났고, pH는 4.5-5.8으로 특이한 사항을 발견할 수 없었다.

최근 환경, 경제적으로 관심이 큰 괴산군 덕평광산은 우라늄 광산으로 시료 채취는 광산 앞 하천수와 지하수 1번(김 ○ ○ 덕평리 144-2), 지하수 2번(김 ○ ○ 덕평리 220), 간이상수도(청천면 덕평출장소)를 채취하였다. 라돈은 현장측정한 결과 하천수 1440pCi/L, 지하수 1번 5595pCi/L, 지하수 2번 1983pCi/L, 간이상수도 507pCi/L로 나타났다. 우라늄은 하천수에서 0.078 μ g/L, 지하수 1번 0.000 μ g/L, 지하수 2번 0.017 μ g/L, 간이상수도 0.746 μ g/L으로 나타났다. 조사대상 방사성물질은 자연계 존재하는 물질로서 우리나라의 경우 현재까지 먹는물 수질기준은 없으며, 미국의 경우 우라늄 30 μ g/L, 라돈 4,000pCi/L(제한치), 전알파 15pCi/L, 라듐 5pCi/L로 관리하고 있다. 라돈의 경우 지하수 1번 5595pCi/L로 미국의 제한치를 초과하여 음용중단 등을 권고 조치 하였으며, 그외 지점은 모두 제한치 이내로 나타났다. 우라늄은 모두 미국의 30 μ g/L 이내로 나타났다. 환경부에 따르면 2006년도 지하수중 자연방사성물질 함유실태 2차 조사결과 우라늄 1개지점, 라돈 24개 지점이 미국의 먹는물 제한치를 초과하여 음용중단, 폭기장치 설치 등 적정 조치한 사례가 있다.

3. 산성폐수의 처리

광산 주변의 환경은 황철석의 분해작용으로 침출된 중금속으로 많이 오염되어 있다. 갱내 황철석은 박테리아의 작용으로 분해가 촉진된다.¹³⁾

산성폐수는 주로 산성 갱수와 야적장의 폐석 및 광미의 침출수에 의하여 발생

되는데 단양탄광 300m 하부지점 산 굴에서 갱내수 형태로 흘러나오고 있다. 산성폐수에 의한 광해를 막기 위해서는 갱내에 잔존하는 황철석이 산화되지 않도록 산소의 유입을 차단하고 환원환경을 조성해야 한다. 황철석은 혐기성의 낮은 Eh(토양의 산화환원전위)와 강산성에서는 Fe^{2+}/Fe^{3+} , SO_4^{2-} 로 분해되어 산성폐수의 발생원이 됨으로 황철석의 분해를 막고 황산철을 다시 황철석으로 되돌려 안정하게 유지하려면 인위적으로 Eh를 낮추고 pH를 올려야 한다. Eh는 공기를 차단하고 용존산소를 낮추고 석회석을 이용하여 pH를 올린다. 여기에 유기물을 혼합하여 박테리아에 의한 H_2S 생성작용이 촉진된다.^{14,15,16,17)} 해결방안을 요약하면 아래와 같다.^{18,19,20)}

1. 구갱내 광체의 산화방지

강수의 갱내 침투 방지 - 점토로 지표를 피복, 식생하고 배수로를 설치한다.

갱내 빈 공간의 최소화 - 폐석, 광미 및 슬러지로 채운다.

2. 구갱의 환원환경 조성

산성폐수의 유출차단 - 갱구쪽을 콘크리트벽으로 봉쇄 나무조각, 유기물의

혼입 - 미생물학적 환원환경의 조성 $2CH_2O + SO_4^{2-} = H_2S + 2HCO_3^-$

$M^{2+} + H_2S + 2HCO_3^- = MS + 2H_2O = 2CO_2$ (M^{+2} :용존 금속이온)

$Fe^{2+} + H_2S + S^0 \rightarrow FeS_2 + 2H^+$

석회석 조각의 혼입 - 중화에 의한 이차 황화물의 침전을 촉진한다.

3. 습지 설치 - 반영구적이고 경제적인 생물학적 처리법이다.

4. 슬러지의 처리 - 탈수, 고화후 갱내 충전

단양탄광의 갱외로 배출되는 산성폐수의 양이 비교적 적은 편이므로 이재영 1996 등²⁰⁾이 달성광산에 적용시킨 방법과 동일하게 이차 오염원을 유발하기 쉬운 화학적 처리보다 장기적으로 자연처리가 가능한 습지법²¹⁾을 이용하는 것이 경제적이라 판단된다. 화학적 폐수처리장을 설치할 경우 슬러지 재처리 문제는 이차오염원이 발생함으로 갱내에 매우는 것이 가장 안전하고 경제적이라 여겨진다.

IV. 결 론

2007년도 도내 폐광지역 토양오염도 조사 물시료 33개, 토양시료 39개 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제천 당두광산 하천수에서 Cd의 농도가 0.017mg/L, 보은 송평광산 사방댐 물에서 Cd의 농도가 0.053mg/L로 하천수 수질기준중 사람의 건강보호기준(Cd 0.005mg/L)을 초과한 것으로 나타났다.
2. 토양분석 결과 충주 연수동광산, 옥천 대부광산, 월신(홍우)광산, 영동 월전광산, 괴산 풍산개발, 진천 유창광산, 음성 무극광산, 단양 단양탄광, 봉양탄광, 태화광산 등이 모두 토양오염우려기준 이내로 나타났다.
3. 제천 당두광산 1번 토양에서 Cd의 농도가 5.049mg/kg, Zn의 농도가 1191.901mg/kg, 3번 토양에서 Cd의 농도가 4.638mg/kg, Zn의 농도가 660.324mg/kg, 보은 송평광산에서 3번 논 토양에서 Ni의 농도가 149.111mg/kg, Zn의 농도가 458.731mg/kg으로 우리나라 토양오염우려기준을 초과한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김정대, 2005. 강원도 폐금속광산지역의 광미와 주변토양의 중금속 오염현황 및 오염도 평가. J. of KSEE / Vol. 27, No. 6, June, p. 626-634.
2. H. J. Oh and J. Y. Lee, 2003. Korean Society of Soil and Groundwater Environment, 8, 69.
3. 이재영, 이인호, 이순영, 1996. 금속폐광산주변의 토양, 식물 및 하천의 중금속오염에 대한 지화학적 연구 -달성 및 경산광산- Econ. Environ. Geol. Vol. 29, No. 5, p. 597-613.
4. 김준범, 우승순, 안중혁, 전충, 권영두, 정영진, 박영하, 2005. 강원도 지역의 용도별 토양의 수소이온농도 및 중금속 오염 평가 J. Korean Ind. Eng. Chem., Vol. 16, No. 4, p. 556-562.
5. 이병규, 고일하, 2003. 울산지역 토양 중의 중금속 오염도 분석연구 J. of KSEE / Vol. 25, No. 11, p. 1436-1447.
6. 농촌진흥청 농업기술연구소, 1998. 토양화학분석법
7. 환경부, 2002. 토양오염공정시험방법
8. 환경부, 2002. 토양환경보전법시행규칙, 토양오염기준물질, 토양오염실태조사
9. 환경부, 2003. 2002년도 토양측정망 및 실태조사 결과
10. 한국환경기술개발원, 1994. 휴·폐광된 금속광산지역의 오염관리대책, 최종보고서
11. 전효택, 1998. 토양시료채취방법의 문제점 및 해결방안(폐광산 중심), 오염토양분석워크숍, 한국과학기술연구원/한국토양환경학회, 서울, pp. 113-129.
12. Alloway, B. J., 1990. Heavy metal in soil, Blackie and Sons Ltd., pp. 29-39.
13. Bridwell R. J. and Travis, B. J. 1995. Numerical simulation of acid mine drainage (AMD) in a fully-coupled 3-D ground water flow and chemical transport model: part I, field example and validation. Sudbury '95

Conference Proceeding on Mining and the Environment.

14. Nicholson, R. V., Gillham, R. W. and Reardon, E.J. 1988. Pyrite oxidation in carbonate-buffered solution : 1.Experimental kinetics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 52, p. 1077-1085.
15. Nicholson, R. V., Gillham, R. W., Cherry, J.A. and Reardon, E.J. 1989. Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barrier. *Can. Geotech. J.*, v. 26, p. 1-8.
16. Blowes, D. W. 1992. Temporal observation of the geochemistry and mineralogy of a sulfide-rich mine-tailings impoundment, Heath Steele Mines, New Brunswick, *Explor. Mining Geol.*, v. 3, p. 251-264.
17. Blowes, D. W., Ptacek, C. J., Bain, K. R., Waybrant, K. R. and Robertson, W. D. 1995. Treatment of mine drainage water using in situ permeable reactive walls. Sudbury '95 Conference Proceeding on Mining and the Environment, v. 3, p. 979-988.
18. 이재영, 1995a. 달성폐광산의 지질, 광상, 환경오염 및 지화학적 광해저방안에 대한 조사연구. 경북대학교 환경과학연구소, 24p.
19. 이재영 1995b. 휴 · 폐광산 폐수에 의한 수질의 오염과 조사 및 광해대책. 대한광업진흥공사. 4p.
20. 이재영, 이인호, 이순영, 1996. 금속폐광산주변의 토양, 식물 및 하천의 중금속 오염에 대한 지화학적 연구 - 달성 및 경산광산 - *Econ. Environ. Geol.* Vol. 29, No. 5, p. 597-613.
21. Michelutti, B. and Wiseman, M. 1995. Engineered wetlands as tailings rehabilitation strategy : Restoration and recovery of an industrial region. Springer-Verlag, p. 135-142.

