

지하수 오염과 농촌의 음용수 처리방법에 관한 고찰

Review of the Groundwater Contamination and Rural Drinking Water Treatment

윤 춘 경*

Yoon, Chun-gyeong

1. 서 론

우리 인간들은 오래전부터 폐기물을 편이성, 경험, 경제성 또는 처리효과 등에 따라 여러가지 모양으로 처분해 왔다. 이같은 폐기물들이 자연의 자정능력에 의해 우선 처리되나 그 능력의 한계를 넘어서도록 계속 버려질 경우 이에 의한 환경오염문제가 시작되어, 여기서 유출되는 침출수는 지하수를 오염시킬 수 있으며 이러한 경우 그 피해는 상당히 오랜 기간이 경과한 뒤 때로는 다음 세대에 미치기도 한다. 지하수의 오염은 냄새, 맛, 색깔 등 불쾌감을 주기도 하나 병원균이나 유독성물질 등 인체에 해로운 물질에 의해 오염되었을 경우 그 피해는 훨씬 더 심각하다.

지난 50여년 동안 합성유기화합물의 사용이 급증하여 최근에는 약 63,000여개의 합성유기화합물 등이 산업에 여러가지 용도로 사용되고 있으며 매년 약 500~1,000개씩 증가하고 있는 추세인데, 이들이 인체에 미치는 장기적인 영향은 아직 검증되지 않은 상태여서 이들에 의한 지하수 오염이 주요 관심사가 되고 있다. 최근까지 지하수에서 검출된 화학물질은 200개가 넘으며 그중에 약 175개는 유기화합물이고 약 50개 정도가 무기화합물이다 (USEPA, 1990). 이 화학물질들의 출처는 자연에

서 또는 인간으로부터 비롯될 수 있는데, 이들 중 유독한 오염물질에 의해 오염된 지하수는 사용하지 못하게 되기도 하며 경우에 따라서는 수십년 또는 수백년동안 위험한 상태로 지속되기도 한다 (Pettyjohn, 1989). 특히 우리나라는 최근에 계속되는 가뭄의 영향으로 지하수개발에 박차를 가하며 전국적으로 많은 천공작업을 하고 있는데, 이 과정에서 부주의나 관리소홀 등으로 지하수가 오염될 가능성이 높아져 지하수를 거의 처리하지 않고 음용수로 사용하고 있는 우리 농촌의 실정을 고려할 때 이에 대한 각별한 주의가 요구된다.

본 연구에서는 지하수를 오염시키는 오염원과 그 회복방법, 그리고 오염된 지하수를 음용수로 사용하기 위한 처리방법에 대해서 고찰 함으로써 지하수 오염의 예방 및 오염된 지하수의 안전한 사용에 도움을 주고자 시도하였다.

2. 지하수의 오염

지하수의 수질은 지표면에 버려지는 폐기물의 처분과 토양의 사용방법에 따라 영향을 받는다. 지표면에 버려졌거나, 쏟아졌거나, 또는 뿌려진 폐기물 중에서 물에 용해되는 물질들은 결국은 지하로 침투하여 경우에 따라서는 지하수를 오염시키게

* 건국대학교 농공학과

되는데, 최근에는 생산성 향상을 위하여 과다하게 사용되는 비료나 농약 또는 밀집형 가축사육으로 인해서 다량으로 배출되는 축산폐기물 등 농촌에서 발생하는 폐기물에 의한 지하수오염도 커다란 관심사 중의 하나이다. 또 다른 원인으로는 지하수의 양수(Pumping) 등을 포함한 사용방법이다. 천공부터 우물을 완성해서 사용하기까지의 과정도 중요하지만 사용하고 폐쇄시키기까지 모든 과정에서 일반적인 경우처럼 오염물질이 토양에 의한 여과과정을 거치지 않고 신속히 지하수에 유입되어 오염시킬 수 있으므로 특별한 주의와 철저한 관리가 필요하다. <표-1>은 지하수의 수질을 오염시키는 오염원들이 요약되어 있다. 여기서 볼 수 있듯이 지하수의 수질오염문제는 주로 ① 지표면에 버려진 물에 용해되기 쉬운 오염물질 ② 지하수면 위에 버려지거나 저장되어 있는 지하 매설물질 ③ 지하수면 밑에 버려지거나 주위의 토양으로부터

추출 되는 물질 등에 의해서 비롯된다. 대부분의 경우 여기에 관련된 과정들이 매우 복잡하여 정확하게는 아직 잘 파악되지 못하고 있다.

오염물질이 지하수를 오염시키는 과정에는 다음과 같은 4가지의 자연적 현상들과 밀접한 관련이 있다(USEPA, 1990).

1) 액체폐기물 또는 물에 용해된 오염물질이 불포화층을 통과할 때 그 토양의 물리화학적인 특성이다. 이 과정에서는 많은 물리적, 화학적, 생물학적 작용이 일어나 감소되므로 불포화층이 두터울수록 오염물질의 농도가 감소 할 것으로 예측된다. 지하수면 아래에서는 토양의 특정한 광물질성분들만 오염물질들과 이온교환이나 흡착작용이 일어나며 다른 성분들은 접촉을 해도 큰 영향을 미치지 않는다.

2) 오염물질이 유입되는 지점에서 유출되는 지점까지의 과정에서 이들을 감소시키거나 제거하려는 자연현상들이다. 여기에는 여과, 흡착, 이온교환, 확산, 산화, 그리고 미생물학적 분해작용이나 희석 등이 있다.

3) 폐기물이 침투하기 시작하여 유출되기까지의 흐름의 수리학적 현상이다. 오염물질이 지하에서 이동하는 경로는 직접적으로, 불포화층을 경유하여, 대수층 사이의 누출을 통하여, 또는 포화층내에서의 움직임 등이다.

4) 오염물질 그 자체의 성질로써 물리적, 화학적, 생물학적 안정성이다. 오랫동안 사용하여 온 화학물질의 특성은 비교적 잘 알려져 있으나 최근에 개발하여 사용하는 합성유기화합물들에 대해서는 아직 파악이 완전치 못한 상태이다.

<표-1> 지하수 수질의 오염원(USEPA, 1990)

Sources
Originate on the Land Surface
1. Infiltration of contaminated surface water
2. Land disposal of solid and liquid waste materials
3. Stockpiles, tailings, and spoil
4. Dumps
5. Disposal of sewage and water treatment plant sludge
6. Salt spreading on roads
7. Animal feedlots
8. Fertilizers and pesticides
9. Accidental spills
10. Particulate matter from airborne sources
Originate above the Water Table
1. Septic tanks, cesspools, and privies
2. Surface impoundments
3. Landfills
4. Waste disposal in excavations
5. Leakage from underground storage tanks.
6. Leakage from underground pipelines
7. Artificial recharge
8. Sumps and dry wells
9. Graveyards
Originate below the Water Table
1. Waste disposal in wet excavations
2. Agricultural drainage wells and canals
3. Well disposal of wastes
4. Underground storage
5. Secondary recovery
6. Mines
7. Exploratory wells and test holes
8. Abandoned wells
9. Water supply wells
10. Groundwater development

3. 오염된 지하수의 수질개선

지하수의 오염처리에는 많은 경비와 오랜시간이 소요되므로 오염의 사전예방이 최선의 방법이나 일단 지하수가 오염되었을 경우에 선택할 수 있는 방법들을 요약해 보면 ① 현장처리, ② 지상처리, ③ 오염원의 통제/제거, ④ 오염된 지하수의 포기, 그리고 ⑤ 오염문제 자체를 무시하는 방법 등이 있을 수 있다. 오염된 지하수를 오염이전의 상태까지 회복시키는 데에는 일반적으로 자연적/인

위적인 방법을 이용하여 현장에서 직접 처리하거나 오염된 지하수를 지상으로 끌어올려 처리하는 방법이 이용된다. 어떤 방법이 적용되든지 오염된 지하수 뿐만 아니라 그 오염을 야기시키는 오염원도 제거하거나 통제하여야 한다. 오염원의 제거나 통제 방법으로 자연적인 현상에 의해 지하수를 오랜 시간에 걸쳐 서서히 회복시키거나 오염된 지하수를 지상으로 끌어올린 후에 강물에 유량이 충분하여 희석효과가 클 경우에는 특별한 처리없이 강물에 유입시키기도 한다. 지하수의 보충으로 인한 자연적인 처리도 회복시키는데 도움이 되나 시간이 많이 걸려서 이러한 회복에는 수년에서 수십년이 소요되기도 한다. 일반적으로 지하수의 회복에는 자연적인 방법과 공학적으로 잘 설계된 인위적인 방법을 병행시켜서 그 회복에 소요되는 기간을 단축하는 방법이 사용되고 있다. 오염된 지하수의 회복에는 오염현장과 오염물질에 대한 충분한 이해가 현실적이고 경제적인 처리방법의 결정에 필수적이다. 실제로 많은 경비와 시간을 들여서 처리한 결과 예상했던 것보다 저조한 처리효과를 거두며, 동등한 처리효과에 필요 이상으로 과다하게 경비가 소요된 경우가 많다(Bauman, 1989).

1) 오염원의 통제

진행중인 지하수 오염을 감소시키거나 제거하는 데에는 오염원의 적절한 통제가 중요한데 여기에는 오염원의 제거, 지표수의 관리, 지하차수벽 설치, 또는 지하수 흐름의 통제들이 고려될 수 있다.

오염원의 제거 : 오염된 토양이나 매립지에서의 침출수 등을 제거 또는 수거하여 처리시설로 옮겨 처리하는 방법으로 여기에 소요되는 경비가 처리하고자 하는 자원의 경제성과 비교하여 타당성이 있을 때만 가능하다. 때로는 제거하여 재매립하는 과정 등이 한곳에서 다른 곳으로 문제를 옮겨놓는 결과만 초래할 수 있고 이 과정에서 또다른 문제를 야기시킬 수도 있다.

지표수관리 : 지표수 관리는 매립장 등 폐기물이 쌓여있는 지역에서 강우에 의한 지표수의 흐름이나 지하로의 침투를 감소시키는 방법인데 지하수를 오염시키는 오염물질들의 이동은 대부분 이들에 의해서 이루어진다. 현장의 계단식 관리, 침투

방지용 피복, 지표면에 식물 재경작, 작은 방벽이나 제방, 우회도수로, 침전조 등의 설치들이 고려될 수 있다. 투수성이 낮은 피복재를 사용하면 지하로의 침투를 줄일 뿐 아니라 오염된 토양으로부터 대기를 통한 확산도 억제하는 효과도 있는데 주로 진흙같이 투수성이 낮은 토양, 인공섬유, 소일시멘트, 아스팔트 등이 사용된다. 식물의 재경작은 매립지의 표면을 안정시키는 경제적인 방법인데 이는 빗방울이 토양피복에 주는 충격을 줄이고, 지표수의 흐르는 속도를 낮추며, 토양에 강도를 더해 강우나 바람에 의한 침식도 감소 시키며 또한 외부적인 경관도 개선시킨다.

지하차수벽 설치 : 특정지역에 지하수의 유출입을 통제하기 위한 시설로서 깨끗한 지하수가 오염된 부분과 접촉하는 것과 상층부에서 침출수가 유입되는 것을 방지할 수 있다. 차수막의 종류는 ① Slurry trench walls ② Grout curtains ③ Vibrating beam walls ④ Bottom sealing ⑤ Displacement 등이다. Slurry trench walls는 폐기물 매립지에서 흘러내려오는 지하수 흐름의 상류에 설치하여 오염이 심한 지하수의 유입을 막거나 오염된 지하수 하류에 설치하여 오염이 확산되는 것을 방지하며, 또는 오염된 지하수 주위에 설치하여 이들을 고립시키기도 한다. 이의 설치하는 곳은 굴착하여 5~7%의 Bentonite를 섞은 진흙으로 되메움하는데 비교적 짧은 기간에 설치되고 오랜기간 사용할 수 있으며 설치과정에 주위 환경에 영향을 적게 미쳐서 넓은 오염지역을 통제할 때 효과적인 방법으로 알려져 있다(Nielsen, 1983). Grout curtains는 지하에 관을 통하여 시멘트나 실리카같은 물질을 압력으로 주입시켜서 토양사이 공극이나 기타 구멍 등을 밀폐시키는 방법으로 일반적으로 안전한 밀폐를 위해서 2줄 이상의 설치가 필요하다. Grouting으로 비교적 효과적인 차수벽을 형성할 수 있는데 Grouting된 부분 사이의 틈새를 통한 누수의 가능성 등으로 완전한 차수효과에 대해서는 확인하기 어렵다. Vibrating beam walls는 I-beam을 지하 원하는 지점까지 타설해서 진동을 준 후에 서서히 뽑아올리면서 Beam바닥에 부착된 노즐을 통해서 slurry를 주입시켜 약 10cm 정도의 얇은 차수벽을 설치하는데

이 방법은 모래나 자갈처럼 토양이 느슨할 경우에 효과적이다. Bottom sealing은 Grouting을 이용하여 오염물질이 밑으로 움직이는 것을 방지하기 위하여 수평 또는 곡선면의 차수벽을 설치하는 방법이다. Block displacement는 비교적 새로운 Plume 관리방법으로 Grouting 기법을 이용해 특정오염지역의 바닥과 주위에 차수벽을 설치한다. 이 외에도 Membrane이나 Synthetic sheet curtain 같은 재료로 Grouting이 의한 차수벽과 비슷한 공법에 사용하기도 한다.

지하수 흐름의 통제 : 정상적인 지하수 움직임에서 오염물질을 고립시켜 생활용수용 우물, 다른 오염되지 않은 대수층, 또는 지표수로의 유출을 방지하기 위한 방법으로 지하수의 추출/주입용 우물이 많이 사용되어 왔는데 긴 Pumping 기간과 우물의 설치 및 관리에 소요되는 높은 비용같은 단점이 있으므로 지하지층의 특성에 따라 그에 적절한 적용이 필요하다.

2) 지상처리

오염된 지하수의 처리에 많이 사용되는 방법으로 지상에 오염된 지하수를 끌어올린 후에 오염의 특성에 맞게 처리하여 지표수로 흘려보내거나 다시 지하로 주입시킨다. 이 방법은 Pump-and-treat라고도 불리며 다른 방법보다 적용효과가 비교적 가시적인데, 효과적이고 경제적인 처리를 위해서는 오염현장 주변의 지질구조, 오염원, 오염물질의 특성들에 대한 충분한 파악이 필요하다 (Keely, 1989). Pumping system과 비슷한 다른 방법으로 interceptor system이 사용되기도 하며 이 방법은 지하의 원하는 깊이까지 Trench를 굴착한 다음 구멍난 집수관을 지하수 흐름과 직각방향으로 설치하여 오염된 지하수가 이동하는 것을 방지하거나 또는 매립물질의 침출수를 수거하기도 한다. 이처럼 여러가지 방법에 의해 지상으로 옮겨진 오염된 지하수는 물리적, 화학적, 또는 생물학적 방법에 의해 처리 된다. 물리적 처리로는 여과, 흡착, 비중을 이용한 분리, 역삼투압, 공기나 수증기에 의한 Stripping, 그리고 소각 등이 있으며, 화학적 처리로는 활성오니식, 폭기저수법, 혐기성 분해, 살수여상 및 여과, 그리고 회전판막식 방법

등이 있다. 이러한 지상처리방법들은 현재까지 광범위하게 사용되어 오고 있는데 근래에 많은 경비와 시간을 투자하여 지상처리하여 오고 있는 오염현장의 처리실적들을 분석한 결과 그 효율성에 심각한 의문이 제기되고 있다(Kirkpatrick, 1993 ; Cartwright, 1991 ; Mackay and Cherry, 1989).

3) 현장 처리

오염된 지하수를 지상으로 끌어올리지 않고 오염된 지역에서 처리하는 방법으로 지상처리 방법과 같이 많은 처리시설이 필요하지 않고 지하에서 처리하기 때문에 오염물질에 노출이 적어서 유리한 데 이 방법은 대수층의 투수계수같은 물리적인 요소와 오염물질의 특성, 그리고 대수층을 이루고 있는 구성성분의 화학적인 성질에 따라 처리효과가 크게 달라진다. 이 방법은 다른 처리방법보다 아직 개발이 덜 된 상태이나 몇군데 시범적인 적용 사례는 매우 성공적이었다(Wagner, et al., 1986). 현장에 직접 적용하기 전에 실험실이나 pilot scale의 실험이 선행되어야 하는데 물리화학적 처리와 생물학적 처리로 크게 구분해 볼 수 있다.

물리화학적 처리 : 유기 및 무기화합물의 오염물질을 화학적인 방법으로 고착시키거나, 이동시키거나, 독성을 제거 하는 방법 등이다. 산화/환원에 의한 침전으로 고착시키거나, 토양에 부착되어 있는 성분들의 탈착, 화학적인 작용을 이용한 독성 제거등이 이용되는데 이 과정에서 사용된 화학물질들이 처리하고자 하는 오염물질들은 처리할 수 있으나 다른 물질들과 예측치 못했던 반응을 일으켜서 오히려 더 유독한 다른 물질을 만들어 낼 수도 있다. 오염물질을 제한된 구역 안에서 이동확산되지 못하도록 고착시키는 데에는 침전, Chelation, Polymerization 등이 사용되며, 오염된 토양에는 Solidification 등이 사용된다. 독성제거에는 중화, 가수분해, 투수성 처리방법 등이 있는데 투수성 처리방법이란 Trench를 파고 오염물질과 반응을 잘 하는 물질의 투수성의 층을 설치하여 오염성분이 이 부분을 통과할 때 이들과 반응하여 유독성이 제거된 물질로 변환 후에 고착되도록 하는 방법으로 주로 지하수위가 깊지않은 지역에 적용이 유리하다. 여기에 사용되는 물질로는 석회석,

Nonpolar 오염물질을 제거하기 위한 활성탄, 용해된 중금속을 제거하기 위한 Zeolite나 이온교환용 resin 등이다. 중화작용에 의한 독성제거에는 농도가 낮은 산이나 염기를 대수층에 주입시켜 pH를 원하는 만큼 조정하는데, Tolman et al.(1978)은 이 방법은 산업폐기물에 의한 오염지역에는 가능하나 일반 생활폐기물에 의해 오염된 지역은 혐기성상태가 많아서 중화시키는데 시간이 많이 소요되므로 적합하지 않다고 지적했다. 오염물질이 토양입자에 강력하게 흡착되어 있으면 지상처리에서 뿐만 아니라 현장처리에서도 비효율적이어서 이를 탈착시키는 것이 필요한데 여기에는 다량의 물이나 solvent를 흘려보낸 후에 수거하는 방법이 사용된다. 물에 용해되기 쉬운 오염물질에는 물을 사용하나 중금속이나 유기화합물 등에는 일반적으로 산성용액을 사용하며 세척제의 주입방법도 사용이 가능하다. 휘발성 유기화합물을 불포화층에서 제거할 때 근래에는 진공추출법이 많이 사용되는데 이 방법은 투수성이 높고 균일한 토양으로 이루어져 있을 때 가장 적합하며(Pacific Environmental Services, 1989), 이 방법을 추출하는 물질이 인화성이 강하므로 각별한 주의가 필요하다. 유독성을 제거하기 위하여 가수분해가 사용되는데 오염물질이 분해되어가는 과정을 잘 파악해야 하며 때로는 중간생성물이 오히려 더 유독할 수도 있다.

생물학적 처리 : 두가지 기본적인 접근방법으로써 자연적 처리법과 기존 미생물의 왕성한 번식을 돕기 위해 영양분을 공급하는 개량식 처리법이 있다. 생물학적 처리방법이란 유독성 유기화합물질을 미생물에 의해 비독성 물질로 변화시키는 방법으로써 미생물이 활동하는 환경, 현장의 수문학적 조건, 그리고 오염물질의 분해가능성등에 의해 처리효과가 크게 좌우된다. 대부분의 오염물질들이 호기상태에서는 쉽게 감소되나 혐기상태에서 감소되는 물질은 많지 않다. 지하수나 토양에서 생물학적 처리는 매우 느려서 오염물질에 따라 수년씩 걸리기도 한다. 그러나 생물학적 처리 방법은 오염물질 자체가 파괴되기 때문에 다른 방법처럼 처리 후의 찌꺼기를 취급하는 번거로움이 없어 유리한 방법이다. 자연식 처리는 지하환경에서 계속해서 일어나고 있으며, 지하수나 토양에 있는 오염

물질을 결국에는 완전히 제거하거나 다른 종류의 물질로 변화시킨다. 오염이 탐지된 후에는 이미 이처럼 자연식 방법으로 처리되어 온 상태를 계속 유지할 것인지 아니면 개량식 처리로 처리속도를 증가시킬 것인지의 판단이 필요하다.

지하에서 오염물질을 분해시킬 수 있는 미생물의 번식에는 신진대사에 필요한 영양분이나 산소와 같은 성분에 의해 그 활동에 제약을 받는다. 대부분 이들 미생물은 토양입자에 단단히 부착되어 있어서 영양분이 지하수에 용해되어 이동 확산되어 이들의 활동 영역안에 보내져야만 섭취가 가능하다. 불포화층에서는 휘발성 유기화합물이 증기 상태에서 쉽게 이동할 수 있고 산소도 어느정도 공급이 가능하나 지하수면 밑에는 호기성 신진대사가 산소의 용해량에 의해 제약을 받는다. 생물학적 처리의 속도는 미생물의 신진대사, 섭취가능한 영양분, 지하수 흐름의 상태, 분해력을 갖은 미생물군의 형성, 그리고 오염물질의 유독성 등에 의해 결정된다. 석유화학물질의 생물학적 처리에 대한 연구가 다른 오염물질에 비해 매우 활발히 진행되어 오고 있는데 지하대수층의 회복은 Raymond et al.(1986)에 의해 개발된 방법이 널리 사용되고 있다. 이 방법은 처음에 물리적 방법에 의해 처리 가능한 만큼 처리한 후에, 지하의 오염상태를 상세히 파악하고 실험실에서 자연적으로 존재하는 미생물에 의해 처리가능성 그리고 이들의 활발한 번식을 위해서 필요한 영양분 등을 파악한 후에 오염지역에 우물들을 설치하여 이를 통해 영양분과 산소를 공급한다. 이 경우 지하수의 흐름을 통제하는 것이 필수적인데 이는 영양분과 산소가 오염지역에만 공급되도록 하기 위해서다. 이같은 생물학적 현장처리방법은 적용이 점차 활발해질 전망이다. 이 부분에 대한 추가 참고자료는 USEPA(1990)에서 얻을 수 있다.

4. 음용수 사용을 위한 지하수처리

지하수 오염문제는 전통적으로 지하수를 특별한 처리없이 식수나 생활용수로 사용해 오고 있는 우리나라 농촌같은 경우에 주민들의 건강을 직접적으로 위협할 수 있어서 시급히 대책을 세워야 하는

당면과제중의 하나이다. 농촌에서 상수원으로 사용하는 지하수는 대부분 지면으로부터 깊지 않은 곳이 많아서 그만큼 지면으로부터 오염물질이 스며들어 오염될 수 있는 가능성이 높다. 안전한 음용수의 사용은 문화생활의 기본이며 비위생적인 음용수의 사용은 많은 질병을 유발할 수 있는데, 인류가 고생하는 모든 질병의 약 80% 정도가 비위생적인 음용수의 사용에서 비롯된다고 하는데 (Hofkes, 1986) 안전한 식수의 사용이 얼마나 중요한 문제인가 짐작할 수 있다. 이러한 질병들은 대부분 인간이나 가축의 배설물에 포함되어 있는 세균이나 미생물, 또는 농약이나 공장폐수 속의 유독성 화학물질에 의해 유발되므로, 사용하는 음용수의 오염여부를 확인하고 이미 오염된 상수원은 적절한 처리 후에 사용하도록 하고 상수원자체가 더 이상 오염되는 것을 방지하는 것은 물론 오염된 상수원의 회복노력이 필요하다. 음용수로써뿐 아니라 생활용수로서 피부접촉을 통해서 질병이 옮겨질 수 있음을 고려할 때 상수원의 수질보호와 안전한 생활용수의 사용은 농촌주민들의 건강을 위해서 해결해야 할 우선과제 중의 하나이다.

도시의 상수처리시설들은 강물이나 저수지 등 보호된 상수원으로부터 물을 옮겨와 공학적으로 설계된 처리시설에서 처리하고 수질을 종합적으로 관리하며 각 가정에 상수관을 통해서 공급하는 것이 일반적이는데 농촌에는 인구밀도가 낮고 주거지가 산재해 있으며 경제력에 한계가 있어서 중앙처리 및 공급에 어려움이 있다. 따라서 증가마다 지하수를 특별한 처리없이 직접 음용수로 사용하거나 또는 마을단위로 공동우물을 설치하여 음용수로 사용하고 있는 실정이다. 도시의 상수처리시설들은 전문적으로 관리되며 규칙적인 수질검사로 안전한 상수가 공급되도록 노력하고 있으나 농촌의 상수시설은 사용자 각자가 관리하기 때문에 수질검사등 전문적인 관리에 어려움이 많다. 농촌에서 음용수로 사용하기 위한 지하수의 처리가 도시의 상수처리와 다른 특성을 요약하면 다음과 같다.

① 농촌의 상수원인 지하수는 일반적으로 강물이나 저수지 등 도시의 상수원보다는 수질의 오염상태가 낮아서 도시의 상수처리시설처럼 복잡한 물리적, 화학적, 생물학적 처리들이 모두 필요하지

않은 경우가 많으며 정확한 오염상태를 파악하면 단순한 처리만으로도 충분한 효과를 얻을 수 있다.

② 경제적인 문제때문에 대규모 상수처리시설 및 중앙공급이 어려우며, 그러한 시설을 갖추고 있어도 그 시설을 관리유지하는데 어려움이 많다.

③ 각 지역마다 사용하는 지하수의 오염성분이나 오염정도들이 달라서 그들의 정확한 파악과 그 지역사정에 맞는 효과적이고 경제적인 처리방법의 적용이 필요하다.

④ 상수처리시설의 관리에 유능한 기술인력의 상시확보에 어려움이 있으므로 처리시설 자체를 관리하기에 용이해야 하며 특별히 전문적인 기술이 필요할 경우를 제외하고는 사용자에게 의해 관리 운영될 수 있어야 한다.

소규모 상수처리방법으로써 농촌에 적용가능한 방법은 규모에 따라서 ① 수도꼭지나 사용처마다 설치하여 처리하는 방법(Point-of-Use), ② 수도꼭지나 사용처가 많은 가정의 경우 그 가정으로 들어오는 입구에 설치하여 처리하며 Point-of-Use 보다는 처리용량이 약간 큰 Point-of-Entry 방법, 그리고 ③ 마을단위 공동우물의 처리등으로 구분할 수 있다. Point-of-Use와 Point-of-Entry 방법은 정수기라는 이름으로 알려진 방법과 흡사하며 이들의 선택과 사용에는 처리하고자 하는 오염물질의 성분과 정도에 직접적인 관련이 있다. 처리하고자 하는 오염물질에 대한 이해가 없이 정수시설을 설치하는 것은 효과적인 처리를 기대할 수 없을 뿐 아니라 오히려 역효과를 불러 일으킬 가능성도 있다. 마을단위 공동우물은 사용량이 Point-of-Use나 Point-of-Entry 경우보다 많고 사용자가 많아서 공공성을 갖추어야 한다.

음용수의 수질은 사용자의 건강에 영향을 직접적으로 주는데 대부분의 경우에 사용자들은 수질의 안전도에 대한 확인을 하기 어려우며, 그들의 수질에 대한 반응은 사용자들이 느낄 수 있는 요소들에 의해 좌우된다. 외관상 더러워보이거나 색깔이 있는 음용수는 실제로 그 자체로는 건강에 직접적인 영향이 없는 경우에도 사용자들에게는 잘 받아들여지지 않는다. 따라서 음용수는 위생적이기도 해야 하지만 그 외에 색깔, 맛, 냄새 등도 고려해야 할 중요한 요소들이다. 우리나라 음용수의 수

질기준치가 <표-2>에 요약되어 있으며, 외국의 기준으로써 비교를 위해 WHO(World Health Organization, 1993)에서 guideline으로 제시한 음용수의 수질기준치 중에서 세균, 화학 물질, 그리고 사용자가 불평을 호소하기 시작하는 수질들이 <표-3~5>에 요약되어 있다.

음용수를 처리하기 위해서는 물리적, 화학적, 생물학적 방법들이 있는데 각각의 처리효과와 상세한 적용방법들은 여기에서 서술할 수는 없으나 한

<표-2> 음용수의 수질기준(서울특별시 상수도 사업본부, 1995)

(단위 : mg/ℓ)

구분	항 목	기 준
미생물	일 대 세 균	1ℓ중 100이하 50ℓ에서 불검출
건강상 유해 영향 무기물질	납	0.05이하
	소듐염화물	10이하
건강상 유해 영향 유기물질	아세트산	0.05이하
	아세트산염	0.01이하
건강상 유해 영향 무기물질	아연	불검출
	아연염	불검출
건강상 유해 영향 유기물질	아연염	0.50이하
	아연염	0.05이하
건강상 유해 영향 유기물질	아연염	100이하
	아연염	0.01이하
건강상 유해 영향 유기물질	아연염	0.02이하
	아연염	0.25이하
건강상 유해 영향 유기물질	아연염	0.10이하
	아연염	0.06이하
건강상 유해 영향 유기물질	아연염	0.07이하
	아연염	0.10이하
건강상 유해 영향 유기물질	아연염	0.02이하
	아연염	0.01이하
건강상 유해 영향 유기물질	아연염	0.01이하
	아연염	0.70이하
건강상 유해 영향 유기물질	아연염	0.30이하
	아연염	0.01이하
건강상 유해 영향 유기물질	아연염	0.03이하
	아연염	0.005이하
건강상 유해 영향 유기물질	아연염	0.40이하
	아연염	0.50이하
심미적 영향 물질	경도	300이하
	광산칼슘소비량	10이하
심미적 영향 물질	냄새	무취
	맛	무미
심미적 영향 물질	색도	10이하
	탁도	5도이하
심미적 영향 물질	수온	0.5이하
	수온변동	5.8~8.5
심미적 영향 물질	수중산소	10이하
	수중산소	150이하
심미적 영향 물질	중금속	500이하
	중금속	0.30이하
심미적 영향 물질	중금속	0.30이하
	중금속	2도이하
심미적 영향 물질	중금속	200이하
	중금속	0.20이하

<표-3> 음용수의 세균학적 기준치(WHO, 1993)

Organisms	Guideline value
All water intended for drinking :	
E. coli or thermotolerant coliform bacterial	Must not be detectable in any 100mL sample
Treated water entering the distribution system :	
E. coli or thermotolerant coliform bacterial	Must not be detectable in any 100mL sample
Total coliform bacteria	Must not be detectable in any 100mL sample
Treated water in the distribution system :	
E. coli or thermotolerant coliform bacterial	Must not be detectable in any 100mL sample
Total coliform bacteria	Must not be detectable in any 100mL sample. In the case of large supplies, where sufficient samples are examined, must not be present in 95% of samples taken throughout any 12 month period.

<표-4> 음용수에 함유되어 인체에 영향을 미칠 수 있는 화학물질의 기준치(WHO, 1993)

Constituents	Guidelines	Remarks
Inorganic(mg/L)		
antimony	0.005	
arsenic	0.01	for excess skin cancer risk of 6×10^{-4}
barium	0.7	
beryllium		no adequate data for recommendation
boron	0.3	
cadmium	0.003	
chromium	0.05	
copper	2	
cyanide	0.07	
fluoride	1.5	
lead	0.01	
Manganese	0.5	
mercury(total)	0.001	
molybdenum	0.07	
nickel	0.02	
selenium	0.01	
uranium		no adequate data for recommendation
Organic(mg/L)		
carbon tetrachloride	2	
dichloromethane	20	
1,1-dichloromethane		no adequate data for recommendation
1,2-dichloromethane	30	for excess risk of 10^{-5}
1,1,1-trichloromethane	2000	
vinylchloride	5	for excess risk of 10^{-5}
1,1-dichloroethane	30	
1,2-dichloroethane	50	
trichloroethane	70	
tetrachloroethane	40	
benzene	10	for excess risk of 10^{-5}
toluene	700	
xlenes	500	
ethylbenzene	300	

Constituents	Guidelines	Remarks
styrene	20	
benzo[a]pyrene	0.7	for excess risk of 10 ⁻⁵
monochlorobenzene	300	
1,2-dichlorobenzene	1000	
1,3-dichlorobenzene		no adequate data for recommendation
1,4-dichlorobenzene	300	
trichlorobenzenes(total)	20	
di(2-ethylhexyl)adipate	80	
di(2-ethylhexyl)phthalate	8	
acrylamide	0.5	for excess risk of 10 ⁻⁵
epichlorohydrin	0.4	
hexachlorobutadiene	0.6	
editic acid(EDTA)	200	
nitritotriacetic acid	200	
diakyltins		no adequate data for recommendation
tributyltin oxide	2	
Pesticides(ug/L)		
alachlor	20	
aldicarb	10	
aldrin/ dieldrin	0.03	
atrazine	2	
bentazone	30	
carbofuran	5	
chlordane	0.2	
chlorotoluron	30	
DDT	2	
1,2-dubromo-3-chloropropane	1	for excess risk of 10 ⁻⁵
2,4-D	30	
1,2-dichloropropane	20	
1,3-dichloropropane		no adequate data for recommendation
ethylene dibromide		no adequate data for recommendation
heptachlor and heptachlor epoxide	0.03	
hexachlorobenzene	1	
isoproturon	9	
lindane	2	
MCPA	2	
methoxychlor	20	
metolachlor	10	
molinate	6	
pendimethalin	20	
pentachlorophenol	9	
permethrin	20	
propanil	20	
pyridate	100	
simazine	2	
triflualin	20	
2,4-DB	90	
dichloroprop	100	
fenoprop	9	
MCPB		no adequate data for recommendation
mecoprop	10	
2,4,5-T	9	

가지 강조하고 싶은 것은 수많은 처리방법을 모두 적용할 필요가 없이 각각 Unit operation의 원리를 이해하고 처리하고자 하는 물의 오염상태를 파악하면 의외로 간단하고 경제적인 처리만으로도 충분히 원하는 처리효과를 기대할 수 있다는 점이

〈표-5〉 음용수에 함유되어 사용자로부터 불평을 야기시킬 수 있는 요소와 기준치(WHO, 1993)

Constituents/Parameters	Concentration	Reasons for consumer complaints
Physical Parameters		
colour	15NTU	appearance
taste and order	-	should be acceptable
temperature	-	should be acceptable
turbidity	5NTU	appearance
Inorganic Constituents		
aluminum	0.2mg/ L	deposition,
ammonia	1.5mg/ L	discoloration
chloride	250mg/ L	odour and taste
copper	1mg/ L	taste, corrosion
hardness	-	staining of laundry and sanitary ware
		high hardness : scale deposition, scum formation
hydrogen sulfide	0.05mg/ L	odour and taste
iron	0.3mg/ L	staining of laundry and sanitary ware
manganese	0.1mg/ L	staining of laundry and sanitary ware
dissolved oxygen	-	indirect effects
pH	-	low pH : corrosion
		high pH : taste, soapy feel
sodium	200mg/ L	taste
sulfate	250mg/ L	taste, corrosion
total dissolved solids	1,000mg/ L	taste
zinc	3mg/ L	appearance, taste
Organic Constituents		
toluene	20-170ug/ L	odour, taste
xylene	20-1,800ug/ L	odour, taste
ethylbenzene	2-2,000ug/ L	odour, taste
styrene	4-2,600ug/ L	odour, taste
monochlorobenzene	10-120ug/ L	odour, taste
1,2-dichlorobenzene	1-10ug/ L	odour, taste
1,4-dichlorobenzene	0.3-30ug/ L	odour, taste
trichlorobenzenes(total)	5-50ug/ L	odour, taste
synthetic detergents	-	foaming, taste, odour
Disinfectant and Disinfectant By-products		
chlorine	600-1,000ug/ L	taste, odour
Chlorophenols		
2-chlorophenol	0.1-10ug/ L	taste, odour
2,4-dichlorophenol	0.4-40ug/ L	taste, odour
2,4,6-trichlorophenol	2-300ug/ L	taste, odour

다. 우리나라 농촌의 생활환경 개선의 한 방법으로 비교적 단순하지만 효과적이며 지역사정에 적합한 처리 방법들을 개발 보급하여 농촌주민들이 필요에 따라 처리방법을 선택적용할 수 있도록 하는 도와주는 일이 필요하다. 소규모 상수처리 방법중에 농촌에 적용가능한 방법과 주요처리기능들이 〈표-6~8〉에 요약되어 있다(Lykins et al., 1992 : IRC, 1986).

〈표-6〉 음용수를 사용하기 위한 지하수의 처리방법 (IRC, 1983)

Water Quality	Aeration for		Plain (Rapid) Sedimen- Filtration	Safety of Post Chlorination
	Increa- sing O ₂	Decrea- sing CO ₂		
Aerobic, Fairly Hard, not Corrosive				○
Aerobic, Soft and Corrosive		×		○
Anaerobic, fairly hard, not corrosive, no iron & maganese	×			○
Anaerobic, fairly hard, not corrosive, with iron & maganesen	×		○ ×	○
Anaerobic, soft, corrosive, no iron & maganese	×	×		○
Anaerobic, soft, corrosive, with iron & maganese	×	×	○ ×	○

× = necessary, ○ = optional

〈표-7〉 Point-of-Use나 Point-of-Entry 방법에 의한 유기물 오염 처리방법(Lykins et al, 1992)

오 염 물 질	처 리 방 법				
	Granular Acti- vated Carbon	Packed Tower Aeration	Reverse Osmosis	Ozone Oxida- tion(2- 6ppm)	Conven- tional Treat- ment
VOCS					
Alkanes					
Carbon tetrachloride	++	++	++	-	-
1,2-Dichloroethane	++	++	+	-	-
1,1,1-Trichloroethane	++	++	++	-	-
1,2-Dichloropropane	++	++	++	-	-
Ethylene dibromide	++	++	+	-	-
Dibromochloropropane	++	+	NA	-	-
Alkenes					
Vinyl chloride	+	++	NA	++	-
1,1-Dichloroethylene	++	++	NA	++	-
cis-1,2-Dichloroethylene	++	++	-	++	-
Trichloroethylene	++	++	+	+	-
Aromatic					
Benzene	++	++	-	++	-
Toluene	++	++	NA	++	-
Xylenes	++	++	NA	++	-
Ethylbenzene	++	++	-	++	-
Chlorobenzene	++	++	++	+	-
o-Dichlorobenzene	++	++	+	+	-
p-Dichlorobenzene	++	++	NA	+	-
Styrene	++	++	NA	++	-
PESTICIDES					
Pentachlorophenol	++	-	NA	++	NA
2,4-D	++	-	NA	+	-
Alachlor	++	++	++	++	-
Aldicarb	++	-	++	NA	-
Carbofurn	++	-	++	++	-

오 염 물 질	처 리 방 법				
	Granular Acti- vated Carbon	Packed Tower Aeration	Reverse Osmosis	Ozone Oxida- tion(2- 6ppm)	Conven- tional Treat- ment
Lindane	++	-	NA	-	-
Toxaphene	++	++	NA	NA	-
Heptachlor	++	++	NA	+	NA
Chlodane	++	-	NA	NA	NA
2,4,5-TP	++	NA	NA	+	NA
Methoxychlor	++	NA	NA	NA	NA
OTHER					
Acrylamide	NA	-	NA	NA	NA
Epichlorohydrin	NA	-	NA	-	NA
PCBs	++	++	NA	NA	NA

++=Excellent(70 ~200%), +=Average(30 ~%), -=Poor(0 ~39%), NA=Data not available.

〈표-8〉 Point-of-Use나 Point-of-Entry 방법에 의한 유기물 오염 처리방법(Lykins et al, 1992)

오 염 물 질	처 리 방 법									
	Activ. Alum. Filtr.	Coa- gul/ Filtr.	Corros. Control	Direct Filtr.	Diatomite Filtr.	Granu- la Act- Carb.	Ion Exch. Soft.	Lime Osmosis	Reve- rse	Air Strip
Asbestos	-	++	++	++	++	-	-	-	-	-
Barium	-	-	-	-	-	++	++	++	-	-
Cadmium	-	++	-	-	-	++	++	++	-	-
Chromium III	-	++	-	-	-	++	++	++	-	-
Chromium IV	-	++	-	-	-	++	++	++	-	-
Mercury	-	+to	-	-	-	++	++	++	-	-
Nitrite & Nitrate	-	++	-	-	-	-	++	++	-	-
Selenium IV (Senenite)	++	++	-	-	-	-	-	+	++	-
Selenium VI (Senenite)	++	-	-	-	-	-	-	-	++	-
Arsenic III	++ ^a	++ ^a	-	-	-	-	++	++ ^a	+	-
Arsenic V	++	++	-	-	-	-	++	++ ^a	++	-
Radium 226	-	-	-	-	-	-	++	++	++	-
Radon	-	++	++	++	++	-	-	-	-	-
Uranium	b	++	+	-	-	-	++	++	++	-

++=Excellent(70 ~100%), +=Average(30 ~69%), -=Poor(0 ~29%), a=with preoxidation, b=unknown.

5. 결 론

앞에서 살펴보았듯이 지하수는 여러가지 경로를 통해서 오염될 수 있으며, 일단 오염된 지하수의 처리에는 많은 노력이 요구되며 경우에 따라서는 많은 경비와 시간을 투자하여 적용했던 방법이 기대에 못 미치는 처리효과를 올리기도 한다. 따라서 지하수를 회복시키기 위한 처리방법의 선택에는 오염현장의 물리적, 화학적, 생물학적 특성에 대한 충분한 파악은 물론 사회적, 경제적인 여건들을 모두 고려한 현실적이고 효과적인 방법의 선택이 필

수적이다. 오염된 지하수를 음용수로 사용하기 위해서는 오염의 상태에 적합한 처리방법의 적용이 필요하며 불필요한 과잉처리는 경제적인 손실 뿐만 아니라 오히려 없었던 오염물질을 생성시키는 결과를 초래할 수도 있다. 무엇보다도 중요한 것은 지하수 자원의 오염을 사전에 예방하여 오염된 후에 겪어야 하는 많은 어려움의 원인을 제거하는 일로써 이를 위해서 지하수의 안전한 사용을 위한 적극적인 관리가 절실히 요구된다.

참고문헌

1. Bauman, B. J., 1989. Soils contaminated by motor fuels: research activities and perspectives of the American Petroleum Institute, in Petroleum contaminated soils, Volume 1, edited by Kostecki and Calabrese, Lewis Publishers, USA, pp. 3~19.
2. Cartwright, G. C., 1991. Limitations of pump and treat technology, Pollution Engineering, November, pp. 64~68.
3. International Reference Center for Community Water Supply and Sanitation, 1986. Small community water supplies: Technology of small water supply systems in developing countries, edited by Hofkes, John Wiley & Sons, Great Britain, p. 197.
4. Keely, J. F., 1989. Performance evaluation of pump-and-treatment remediations. Superfund issue paper, EPA 540/8-89/005.
5. Kirkpatrick, G. L., P. G., 1993. How's Your "Pump-and-Treat" System Doing?, Chemical Engineering Progress, October, pp. 47~52.
6. Lykins, B. W., R. M. Clark, and J. A. Goodrich, 1992. Point-of-Use/Point-of-Entry for drinking water treatment, Lewis Publishers, USA, pp. 35~36.
7. Mackay, D. M., and J. A. Cherry, 1989. Groundwater contamination: pump-and-treat remediation, Environmental Science and Technology, Vol. 23, No. 6, pp. 630~636.
8. Nielsen, C. M., 1983. Remedial Methods available in areas of Ground Water Contamination: Proc. 6th National Ground Water Quality Symposium, National Water Well Association.
9. Pacific Environmental Services, 1989. Soil vapor extration VOC control technology assessment: EPA-450/4-89-017.
10. Pettyjohn, W. A., 1989. Development of ground-water management aquifer protection plan: Underground Injection Practices Council and Texas Water Commission.
11. Raymond, R. L., R. A. Brown, R. D. Norris, and E. T. O'Neill, 1986. Stimulation of bio-oxidation processes in subterranean formations: U. S. Patent Office, 3,846,290, Patented November 5, 1974.
12. Tolman, A., A. Balestero, W. Beck, and G. Emrich, 1978. Guidance manual for minimizing pollution from waste disposal sites, EPA 600/2-78/142.
13. USEPA, 1990. Handbook-Groundwater, Volume 1: Ground Water and Contamination, EPA/625/6-90/016a.
14. Wagner, K., K. Boyer, R. Claff, M. Evans, S. Henry, V. Hodge, S. Mahmud, D. Sarno, E. Scopina, and P. Spooner, 1986. Remediation action technology for waste disposal sites: 2nd edition, Noyes Data Corporation, Park Ridge, N, USA.
15. 서울특별시 상수도 사업본부, 1995. 상수도 배급수시설 수질관리 업무지침, p. 88.

약 력

윤 춘 경



1982. 서울대학교 농과대학 농공학과 졸업
 1988. 미국 Texas-Austin 주립대 대학원 M. S.
 1993. 미국 New Jersey주 환경청 선임연구원
 1994. 미국 Rutgers-New Jersey 주립대 대학원 Ph. D.
 현재 건국대학교 농공학과 조교수