

〈報 文〉

지하수자원의 수질 보호

Ground water quality control

鄭 相 玉

1. 서언
2. 지하수 오염원
3. 오염물질의 移動
4. 지하수 모니터링기법
5. 지하수 오염방지 및 원상 회복 기법
6. 지하수 보호 관련 법규
7. 결 언

1. 서 언

지하수자원은 지표수자원과 함께 중요한 자원이다. 地域에 따라서 前者가 중요시 되는 곳도 있고 後者가 중요시 되는 곳도 있다. 우리나라의 경우 년강우량이 비교적 많아 지표수자원이 더 많이 이용되고 있으며 局地的으로 특히 농업용수로 지하수가 이용되고 있다. 앞으로 각종산업의 발달로 용수량이 증가하게 되면 지하수의 중요성이 더 커질것으로 예상된다. 미국의 경우에는 量과 質에서 우수한 지하수를 主 水源으로 한다 즉, 음료수의 50%가, 생활용수의 80%가 지하수로 충당되고 있다. 따라서 미국의 경우 지하수의 수질 보호에 매우 큰 관심을 보이고 있다.

이러한 지하수자원은 오염되지 않게 잘 보호하여야 한다. 한번 오염되고 나면 원상으로 회복시키는 데는 엄청난 비용과 시간이 소요된다. 이러한 지하수자원의 수질 보호를 위하여 알아야 할 오염원의 종류, 오염물질의 이동과정, 지하수 모니터링 기법, 오염방지 및 원상회복 기법, 지하

수 수질 보호 관련 법규 등에 대하여 미국의 중서부지방의 경우를 중심으로 하여 소개하고자 한다.

2. 지하수 오염원

지하수의 수질을 악화시키는 오염원에는 여러 가지가 있다. 이러한 오염원은 그 發生 위치에 따라 크게 지표면, 지하 불포화층 및 포화층으로 區分할 수 있다. 表1은 發生 위치에 다른 오염원의 종류를 보여주고 있다.

첫째, 지표면으로 부터의 오염원에는 오염된 지표수의 침투, 하수와 슬러지의 지표처분, 비료와 농약의 사용, 탱크트럭등의 전복사고로 인한 화공약품이나 기름 등의 옆지러짐 등이 있다. 둘째, 지하 불포화층으로 부터의 오염은 정화조나 간이화장실, 하수처리용 연못, 각종 폐기물의 지하 매립, 지하저장 탱크나 수송관으로 부터의 누출, 지하수의 재충전 등이 있다. 셋째, 지하수위 아래로 부터의 오염은 폐기물의 매립, 排水改善



鄭相玉 1949年 12月 16日生
 慶南 梁山郡 鉄馬面 고촌리 123
 大邱市 北區 논현동 50 그린맨션 107-02
 釜山高等學校
 서울大學校 農工學科
 University of Hawaii 水資源工學 碩士
 Iowa state University 水資源工學 博士
 現在 慶北大學校 農工學科 教授·技術士
 (美國)

3. 오염물질의 移動

Table 1. Sources of groundwater contamination

A. Originating on the land surface
infiltration of polluted surface water
land disposal of solid or liquid waste
stockpiles
dumps
disposal of sewage and sludge
deicing salt usage and storage
animal feedlots
fertilizers and pesticides
accidental spills
B. Origination above the water table
septic tanks, cesspools, and privies
holding ponds and lagoons
sanitary landfill
waste disposal in excavation
leakage from underground tanks
leakage from underground pipes
artificial recharge
sumps and dry wells
C. Originating below the water table
waste disposal in wet excavation
drainage wells and canals
well injection of waste
underground storage
mines
exploratory and abandoned wells

帶水層(aquifer)에 도달한 오염물질은 대류와 확산작용에 의하여 이동하게 된다. 이러한 작용에 의한 오염물질의 흐름방정식의 유도과정은 Freeze and Cherry(1979)에 잘 설명되어 있다. 이 흐름방정식에 대한 해는 초기조건과 경계조건이 주어지고 여러가지 필요한 가정을 정하면 얻을 수 있다. 즉, 시간과 위치의 변화에 따른 오염물질의 농도의 분포상태를 구할 수 있다.

오염물질의 이동에 대한 해를 구하는 컴퓨터 프로그램이 여러개가 개발되어 사용되고 있다. Walton(1984)은 35개의 기본적인 지하수 모델에 대한 PC용 프로그램을 개발하였고, Austin(1986)도 많은 프로그램을 소개하고 있다.

오염물질의 이동에 대한 해를 구하는데 필요한 入力資料로는 帶水層, 이동변수, 오염물질 등에 대한 자료가 있다. 대수층에 대한 자료로는 지하수의 流速, 유효공극율, 혼합층의 두께 등이 있고, 이동변수에는 수평 및 수직방향의 확산계수와 지연계수(retardation factor)가 있다. 오염물질에 대한 자료로는 오염물질의 流量과 初期농도 등이 있다.

미국 환경청 (USEPA)에서는 nomograph를 이용하여 오염물질의 흐름에 관한 해를 구하는 방법을 제시하였다. (USEPA, 1985).

이러한 오염물질의 이동과정을 완전히 이해하고 있어야 어떤 지역의 지하수가 오염되면 적절한 진단과 처방을 내릴수가 있다.

4. 지하수 모니터링 기법

지하수의 오염 여부를 판단하기 위하여는 계속적인 모니터링이 필요하다. 지하수의 모니터링은 관측점으로 부터 시료를 채취하여 필요한 수질검사를 하여야 한다. 모니터링 계획 수립에는 아래 사항들이 포함되어야 한다.

- 가. 물시료 채취 빈도
- 나. 시료채취용 우물의 위치와 크기
- 다. 시료채취 기구

用 우물, 폐기물의 우물주입, 지하저장탱크, 폐기된 우물을 통한 오염 등이 있다.

위에 소개한 위치에 따른 오염원별 오염물질의 종류에는 여러가지가 있다. 농업활동이 활발한 지역에서는 비료나 농약의 잔류물이 지하수에 도달하게 되어 질산염(nitrates), 유기화합물(THMs, Aromatics등), 각종 상표의 농약 등이 지하수를 오염시킨다. 또, 化學공업지역에서는 화재, 관리소홀 및 사고 등으로 각종 유해 화합물질이 지하수를 오염시킨다. 또한 원자력 개발로 인한 방사능 등 기타 여러가지 오염원이 있다.

- 라. 시료채취 직전에 배제시킬 水量
- 마. 우물내에서의 시료채취 깊이
- 바. 현장에서 분석실까지 시료 취급 방법
- 사. 기록 유지 방법

여기에는 경제적인 고려와 환경에 대한 고려가 있어야 하며, 각 지역에 따라 가장 적절한 수준의 모니터링 기법을 선정하여야 한다.

5. 지하수 오염 방지 및 원상 회복 기법.

앞에서 언급한 바와 같이 지하수자원은 한번 오염되고 나면 원상회복에는 많은 비용과 시간이 소요되며 경우에 따라서는 회복에 불가능한 수도 있다. 따라서 되도록이면 사전에 지하수 오염을 방지하는 여러가지 방법을 강구하여야 한다.

表2는 가능한 오염원 통제 전략에 대하여 소개하고 있다. 첫째 전략은 재사용, 원심분리, 여과, 모래건조床 등을 이용하여 오염물의 체적을 감소시키는 것이며, 둘째는 여러가지의 物理的, 化學的 방법을 이용하여 오염물질의 독성을 제거시키는 전략이다.

表3은 지하수자원이 오염되었을 경우 오염정도를 감소(abatement)시키는 방법과 원상회복(res-toration)시키는 방법들을 소개하고 있다. 急性오염의 경우 감소시키는 방법에는 화학물질을 사용하여 中化시키거나 오염된 토양을 제거시키는 방법이 있으며, 원상회복 기법에는 우물을 통하여 오염된 지하수를 제거시키는 방법이 있다. 만성 오염 문제에 있어서는 급성문제의 方法外에 감소시키는 방법에는 차단수로나 불투수성 재료를 이용한 지표면 차단 또는 지하 차폐 등의 방법이 있으며, 원상회복 기법에는 현장에서의 化學처리나 生物學的 처리 방법이 있다.

지하수가 오염되었을 때 미국의 국가 긴급 계획(National Contingency plan)에는 아래의 7단계 계를 거쳐 조치를 하도록 되어있다.

- 1) discovery and notification
- 2) preliminary assessment
- 3) immediate removal

Table 2. Potential Source Control Strategies(after Carter and Knox, 1985)

-
- I. Volume Reduction Strategies
 - A. Recycling
 - B. Resource Recovery
 1. materials recovery
 2. waste-to-energy conversion
 - C. Centrifugation
 - D. Filtration
 - E. Sand Drying Beds
 - II. Physical / Chemical Alteration Strategies
 - A. Chemical Fixation
 1. neutralization
 2. precipitation
 3. chelation
 4. cementation
 5. oxidation-reduction
 6. biodegradation
 - B. Detoxification
 1. thermal
 2. chemical - ion-exchange, pyrolysis, etc.
 3. biological - activated sludge, aerated lagoons, etc.
 - C. Degradation
 1. hydrolysis
 2. dechlorination
 3. photolysis
 4. oxidation
 - D. Encapsulation
 - E. Waste Segregation
 - F. Co-Disposal
 - G. Leachate Recirculation
-

- 4) evaluation and determination of appropriate response
- 5) planned removal
- 6) remedial action
- 7) documentation and cost recovery

즉, 일단 지하수자원의 오염 사실이 발견되면 즉시 필요한 긴급조치를 취하고 난후 細密한 치유계획을 수립하여 表3의 方法들을 이용하여 원상회복을 위한 노력을 한후 마지막 단계에서 소요된 비용을 원인행위자로 부터 징수하게 된다.

Table 3. Methodologies for Ground Water Quality Protection and Treatment(after Carter and Knox, 1985)

Pollution Problem	Goal	Methodologies
Acute	Abatement	<ol style="list-style-type: none"> 1. In situ chemical fixation 2. Excavation of contaminated soil with subsequent backfilling with "clean" soil.
	Restoration	<ol style="list-style-type: none"> 1. Removal wells, treatment of contaminated ground water, and recharge. 2. Removal wells, treatment of contaminated ground water, and discharge to surface drainage. 3. Removal wells and discharge to surface drainage.
Chronic	Abatement	<ol style="list-style-type: none"> 1. In situ chemical fixation. 2. Excavation of contaminated soil with subsequent backfilling with "clean" soil. 3. Interceptor trenches to collect polluted water as it moves laterally away from site. 4. Surface capping with impermeable material to inhibit infiltration of leachate-producing precipitation. 5. Subsurface barriers of impermeable materials to restrict hydraulic flow from sources. 6. Modify pumping patterns at existing wells. 7. Inject fresh water in a series of wells placed around source or contaminant plume to develop pressure ridge to restrict movement of pollutants.
	Restoration	<ol style="list-style-type: none"> 1. Removal wells, treatment of contaminated ground water, and recharge. 2. Removal wells, treatment of contaminated ground water, and discharge to surface drainage. 3. Removal wells and discharge to surface drainage. 4. In situ chemical treatment. 5. In situ biological treatment.

6. 지하수 보호 관련 법규

미국 연방정부의 지하수 보호에 관련된 주요한 법규를 들면 表4와 같다.

이러한 여러가지 법규에 기초한 지하수자원 보호 프로그램이 여러가지가 진행되고 있으며 각 프로그램에 대한 대상 지하수의 범위, 수질등급별 통제 범위, 통제 기간, 통제 방법, 모니터링 기법과 치유기법 등에 대한 개요가 表5에 소개되어 있다.

현재 위의 법규에 기초한 지하수 보호 사업이 수많은 지역에서 진행되고 있으며 특히 RCRA와 CERCLA(일명 superfund)에 의하여 많은 事業이 진행되고 있다. 이러한 지하수자원 보호 관련 사업에는 미국 환경청(USEPA)이 예산 및 감독

Table 4. U.S. Federal Regulations concerning groundwater quality

SDWA	Safe Drinking Water Act
UIC	Underground Injection Control
RCRA	Resource Conservation Recovery Act
UMTRCA	Uranium Mill Tailings Radiation Control Act
TSCA	Toxic Substances Control Act
CWA	Clean Water Act
FIFRA	Federal Insecticide Fungicide and Rodenticide Act
CERCLA	Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act (Super Fund)

Table 5. Existing Federal Ground-Water Protection Programs

Regulation	Scope-what Resource is Protected?	Differential Protection of Groundwater?	Duration of Control?	Regulatory Mechanism?	Monitoring and Remedial Action Approach
SCWA-UIC Parts 144-146	Aquifers which could supply PWS with $\lt; 10,000\text{mg}/1\text{TDS}$	Yes-Class V wells can degrade up to MCLs vs. no degradation for class I, II, III	During well operation, but presumably forever	Classes I to III-Design Standards Class V-non endangerment of USDWs	Specified in Permits
RCRA-264	Uppermost aquifers	No increase in hazardous waste constituents or no violation of MCLs	30 years post closure for disposal facilities	Design and performance standards	Monitoring and remedial action required
RCRA-257	Current USDWS and GW with $\lt; 10,000\text{ TDS}$	Maintain drinking water standards	Unspecified-regulatory scheme implies forever	Design and performance standards	NONE
UMTRCA	Uppermost aquifers	Yes-no increase in Mo or U. Radium 226/228 up to 5pCi, Gross Alpha up to 15pCi	Design objective of 200-1000 years	Design standards-liners required	Case-by-case decisions
TSCA-PCB Part 761	Groundwater (undefined)	NO-no release of PCBs to any groundwater	20-years post closure	Design and location standards	Monitoring Required
CWA-Constr. Grants Part 35	Uppermost aquifers with 3 classes based on current and potential uses	Yes-protection to levels set by three classes	Unspecified	Best practicable waste treatment technology	Case-by-case monitoring to demonstrate compliance
FIFRA-Pesticide Policy	Groundwater	No-max. advisable level based on no effect on 10kg child drinking 1 liter/day	As long as the pesticide is registered	Controls on or prohibition of use of specific pesticides	Monitoring can be required of registrants if GW contamination is concern
High level Rad. Wastes	Groundwater (undefined)	Yes-Some aquifers become part of disposal site	10,000 years	Design and performance standards	NONE
CERCLA-NCP	Which could supply PWS or use by more than one person using scoring system	Yes-Decisions on a case-by-case basis	Unspecified	Case-by-case decisions	Case-by-case decisions

업무를 권장하며 미국 육군 공병단 (USACE)이 주로 설계 및 감리 업무를 담당하고 있다.

7. 결 언

지하수자원의 수질 보호를 위하여 알고 있어야 할 사항에 대하여 간단히 소개하였다. 즉, 오염원의 종류, 오염물질의 이동, 오염방지 기법과 원상회복 기법, 미국의 지하수 수질 보호 관련 법규와 수질 보호 프로그램 등에 대하여 알아보았다.

현재 미국에서는 오염된 지하수자원의 원상회복을 위하여 막대한 예산을 투입하고 있으며 앞으로 더 많은 예산을 투입하게 될 것이다. 이러한 事例를 他山之石으로 삼아 앞으로 우리나라에서도 수자원의 수요가 증가하게 되면 그 중요성이 커지게 될 지하수의 오염을 미연에 방지하기 위하여 모든 방법을 동원하여 지하수 수질 보호에 만전을 기하여야 할 것이다.

8. 참 고 문 헌

Austin, T.A. 1986, Modeling groundwater quantity and quality using microcomputers, ASCE Continuing Education short course, Iowa State Water Resources Research Institute, Iowa State University, Ames, Iowa, pp277.

Bear, J. 1985, Conceptual and mathematical modeling of groundwater flow and Pollution: An overview, Invited Lecture, ASCE, Hydraulics Specialty Conference, August 12-17.

Carter, L.W., and Knox, R.C. 1985, Ground Water Pollution Control, Lewis Publishers, Inc., Chelsea, MI.

Congress of the United States, 1984, Protecting the Nation's Groundwater from Contamination, Vols. I and II, Office of the Technology Assessment, Washington, DC, OTA-0-233.

Environmental Protection Agency, 1984, Ground-Water Protection Strategy, Office of Ground-Water Protection, USEPA, Washington, DC.

Environmental Protection Agency, 1985, Protection of Public Water Supplies from Groundwater Contamination, Technology Transfer, USEPA/625/4-85/016.

Freeze, R.A., and Cherry, J.A. 1979, Groundwater, Prentice Hall, Inc., NJ.

Geological Survey, 1985, National Water Summary-Hydrologic Events, Selected Water-Quality Trends and Ground-Watr Resources, Water Supply Paper 2275, USGS, Washington, DC.

Miller, D.W. (Ed.), 1980, Waste Disposal Effects on Ground Water, Premier Press, Berkeley, CA.

Morrison, R.D. 1983, Ground Water Monitoring Technology; Procedures, Equipment and Application, TIMCO Mfg., Inc., Prairie Du Sac, WI.

Sawyer, C.N., and McCarty, P.L. 1978, Chemistry for Environmental Engineering, 3rd Ed., McGraw-Hill Book Co.

Walton, W.C. 1984, 35 basic groundwater model programs for desktop microcomputers, Short course note, International Ground Water Modeling Center, Butler University, Indianapolis, Indiana, pp175.

Wood, E.F., Ferrara, R.A., Gray, W.G., and Pinder, G.F. 1984, Ground-water Contamination From Hazardous Waste, Prentice-Hall, Inc., NJ.