

미국 지하수자원의 최적관리기법과 보호전략에 관한 연구 The Best Management Practice and Protection Strategies of Groundwater Resources of USA

한정상(Jeongsang Hahn)

(주)HANS 엔지니어링

요약/Abstract

지하수자원의 최적관리기법은 사전에 잠재오염원으로 부터 지하수를 보호하면서 이를 최 적상태로 개발 이용하는 것이다. 특히 지하수 보호전략중 미국의 지하수 보호전략과 지하수 자원의 오염취약성 평가법에 대해 중점적으로 연구하였다. 이러한 제반 전략들은 국내 지하 수자원의 관리기법에 현재 이용되고 있기도 하며 추후 활용되어야 한다.

The best management programs(BMP) of groundwater resources is to protect from potential groundwater contamination and to use it as optimal yield. In this paper, the groundwater protection strategies and empirical assessment methodologies using in USA are presented. Those strategies shall be used for future groundwater management program of our country and part of them are already utilized for the protection plan of the groundwater resources.

서 언

지하수환경에 영향을 미치는 오염원들은 그 종류와 범위가 매우 방대하다. 1985년 미국 국회기술평가국(OTA)은 지하수환경에 영향을 주는 주된 잠재오염원을 Table 1과 같이 6군 33종으로 대분류한 바 있다. 현재 국내에 존재하는 모든 종류의 오염원이 본 분류표에 잘 함축되어 있다. 미국을 위시한 선진제국

들은 이러한 잠재오염원으로 부터 그 인근 지하수자원을 보호하기 위한 노력의 일환으로 인공오염원을 평가하고 오염된 지하수환경의 정화에 대한 우선순위를 결정하기 위해 많은 노력을 기울여 왔으며, 더욱더 이에 대한 조 직적인 필요성이 증대되고 있다.

지하수자원의 오염가능성은 제반 허가 과 정에서 중요한 고려사항이 되고 있을 뿐만 아니라 오염원이나 오염가능성이 농후한 오

Table 1. Sources of groundwater contamination(OTA, 1984)

| 잠재오염원의 종류 | 개개시설물/활동에 따른 | | | 시설물질/활동종합 | | 중요인자 |
|--|--------------|----------------|--------|---------------|------|------|
| | 목적 | 공간적 형태 | 시간적 형태 | 알려진 오염물질의 변화성 | 갯수와량 | |
| 1군. 배출, 방류목적으로 설계된 오염물질 | | | | | | |
| 1. 지하침류(정화조, Cesspools : 지하침투식 침하조 ; 분뇨처리수의 침하조) | W | P ^h | Y | 대 | 다 | X |
| 2. 주 인 정(유해폐기물, 고농도염수의 처분, 축산폐수, 하수, 인공함양) | W/WW | P | YS | 대 | 다 | X |
| 3. 지상살포(관계용 살포, 슬러지와 축산폐수의 농업용 지상살포, 유해 및 비유해폐기물 살포) | W | D.P | S | 중 | 중 | X |
| 2군. 오염물질의 처분, 처리저장용으로 설계된 오염원으로 부터 누출 | | | | | | |
| 4. 매립지(산업유해 및 비유해폐기물, 도시쓰레기 매립지)의 침출수 | W | P ^h | S | 대 | 다 | X |
| 5. 폐기물의 불법투기(open dump) | 〃 | 〃 | 〃 | 대 | 중 | X |
| 6. 주거지에서 폐기물의 무단처분 | 〃 | 〃 | 〃 | 대 | ? | X |
| 7. 지표저류시설(유해 및 비유해폐기물) | 〃 | 〃 | 〃 | 대 | 다 | X |
| 8. 폐기물의 찌꺼기(Waste tailing) | 〃 | 〃 | 〃 | 중 | ? | X |
| 9. 폐기물의 야적장(Waste pile) | 〃 | 〃 | 〃 | 중 | ? | X |
| 10. 비폐기물의 비축지(Non-waste stock piles) | NW | 〃 | 〃 | 소 | ? | X |
| 11. 공동묘지 | W | 〃 | 〃 | 중 | ? | |
| 12. 죽은가축의 매장지 | W | 〃 | 〃 | 소 | ? | |
| 13. 지상저유탱크(유해, 비유해폐기물) | W/NW | 〃 | R | 소 | 다 | X |
| 14. 지하저유탱크(〃) | 〃 | 〃 | R | 중 | 중(?) | X |
| 15. 컨테이너(〃) | 〃 | 〃 | R | 소 | 소(?) | X |
| 16. 야외소각장 및 발파지 | W | P | S | 소 | 소 | |
| 17. 방사능폐기물 처분장 | W | P | Y.S.R | 소 | 소 | |
| 3군. 운송, 배관시설로 부터 누출 | | | | | | |
| 18. 배관(유해폐기물, 비유해폐기물, 송유관, 하수관)에서 누출 | W/NW | P ^h | R | 소 | 중 | X |
| 19. 운송과정에서 누출 | 〃 | P ^h | R | 중 | 중 | X |
| 4군. 기타 활동으로 배출 및 살포된 오염물질 | | | | | | |
| 20. 관개용수의 재순환 | NW | D | S | 소 | 중 | |
| 21. 농약살포 | NW | D | S | 소 | 다 | X |
| 22. 비료살포 | NW | D | S | 중 | 다 | |
| 23. 가축사육장(animal feeding operating)의 가축분뇨 및 폐수 | W | P ^h | Y | 소 | 중 | |
| 24. 재설, 제빙제 살포 | NW | F | S | 소 | ? | |
| 25. 도시지역의 강수 유출 | W | P.D.F | S | 중 | 중 | |
| 26. 광산개발에 따른 광산폐수 | W | | S | 소 | 다 | |
| 27. 대기오염물질의 지하침투 | W | D | S | 중 | ? | |
| 5군. 지하흐름 경로 변경 | | | | | | |
| 28. 채수정(유정, 가스정, 지열온천공, 취수정에서 채수) | NW | P | Y | 중 | 다 | |
| 29. 비폐기물 관련 기타 관정(관측정, 탐사시추공) | NW | P | Y | 소 | ? | |
| 30. 공사용 지하굴착 | W | P.D.F | S | 소 | ? | |
| 6군. 인간활동에 의해 자연적으로 발생하는 오염원 | | | | | | |
| 31. 지표수와 지하수의 연관관계 | W | F | S | 소 | NA | |
| 32. 자연적인 침출 | NW | D.F | YS | 중 | NA | |
| 33. 대수층내로 염수침입과 염수의 역상승현상(Upconing) | NW | D.F | S | 중 | NA | |

염원에 대해 계획된 조사평가를 철저히 요구하고 있다. 그러나 광범위한 지하수환경의 감시체계를 설정, 운영하기 위해서는 막대한 시간과 비용이 소요되므로 지하수자원 오염에 대한 수리지질학적인 취약성 조사와 평가방법에 대해 관심을 두게 되었다. 그래서 지하수자원 오염평가와 그 오염 우선순위 결정과 폐기물매립장을 위시한 제반 위해시설물의 입지 선정과, 감시계획 및 허가서 발부의 기준으로 널리 이용되고 있는 기법중의 하나가 바로 간접평가방법(Empirical assessment methodologies)이다. 지하수 수질관리 측면에서 볼 때 간접평가방법은 인간활동에 의해 발생하는 지하수 오염 가능성을 분류하거나 수치적인 지표를 개발 제시할 수 있는 접근법이다. 지하수 오염가능성은 오염물질의 특성과 지하수환경의 오염취약성 또는 상기 두 인자의 상호관계에 따라 달라진다. 이러한 간접평가방법은 전통적으로 위생 및 유해폐기물 매립장의 입지선정과 그 주변 지하수 자원의 오염가능성 평가뿐만 아니라 액상폐기물, 지표저류시설(SI)에 의한 지하수오염가능성 평가시 널리 이용되어 왔다. 일부오염원의 우선 순위 결정법은 1970년대와 1980년 사이에 개발되어 이용되어 왔다. Table 2는 현재 미국에서 널리 이용하고 있는 간접평가방법을 도표화한 것으로써 이를 이용하여 지하수 오염도에 대한 분석을 수행할 때에는 상당한 수리지질학적인 전문 지식과 판단이 요구된다. 한편 이러한 간접평가방법들은 어디까지나 지하수환경 오염의 상대적인 평가방법이지 최종적인 평가법은 아니다. 그러나 최소한도의 자료와 경비를 이용하여 경제적으로 오염원을 평가하고 위해시설의 입지선정과 지하수 감시체계 계획과 오염된 지하

수의 정화처리의 우선순위를 결정하는데 널리 이용되고 있는 접근법임에는 틀림없다.

지하수 오염가능성 평가방법중에서 폐기물 매립장 입지선정 평가(Landfill site rating)나, 폐기물과 토양 및 입지의 상호연관평가기법(Waste soil-site interaction matrix)과 DRASTIC방법은 폐기물매립지에서 발생한 침출수에 의한 인근 지하수환경의 오염가능성 평가뿐만 아니라 지하수자원 보호전략 수립에 이용할 수 있는 평가방법들이다. 비점오염원인 골프장의 농약과 비료살포에 의한 인근 지하수환경에 미치는 영향평가는 Table 2중 7항의 DRASTIC pesticide나 PESTICIDE Index, SESOIL과 같은 방법을 이용하여 평가할 수도 있다.

지하수 환경변화 예측의 첫 단계는 사업 실시로 인하여 발생된 오염물질에 의해 사업지구를 포함한 인근지역의 지하수환경에 대해 그 오염가능성을 1차로 간접평가방법을 이용하여 그 가능성 여부를 판단한다. 간접평가방법에 의한 평가결과 상술한 지하수환경의 오염가능성이 매우 농후하다고 판단될 시에는 해당지역에 대해 세부적인 수리지질 및 분산특성조사를 실시한 후 제반 대수성 수리인자를 구하고 이들 매개변수들을 이용하여 특정오염원과 대수층의 수리분산능에 의한 대상 지하수환경의 오염현상을 정량적인 전산모형법에 의거 그 오염도를 평가예측한다.

실제 지하수계내에서 지하수의 흐름이나 오염물질의 분산에 관한 식은 대상매체가 이방, 불균질이기때문에 이들 두 식은 모두 매우 복잡한 편미분방정식으로 표현되므로 그 해를 얻기 위해서는 특히 전산해에 의존할 수 밖에 없다. 또한 실제 지하수환경은 매우

Table 2. Empirical Assessment Methodologies of Groundwater Contamination Potentials

| 평가법 | 이용분야 | 평가인자 | 비고 |
|---------------------------------------|---|---|---|
| 1. SIA | Pit, Pond, Lagoon과 같은 액상폐기물의 지표처분장, 입지선정 평가 | 비포화대(k.d.9), 포화대(k.d.6)지하수 수질(TDS 5) 오염원(9) | US/EPA에서 이용 LE-GRAND |
| 2. Land fill Site Rating | 신설 옥상폐기물처분장 및 규모가 큰 폐기물매립지 입지선정 평가 | 거리, 지하수위, IK, 저감인자 | 폐기물처분평가 기본 SYSTEM |
| 3. Site Rating System | 특정산업폐기물처분장의 입지선정 및 오염도평가 | 토양군, 지하수군, 대기군(29) | US/EPA SUPER FUND SITE평가 조사와 정화작업 우선순위 결정에 이용 |
| 4. Harzard Ranking System | 오염지역의 정화사업 순위결정을 위한 유해폐기물 처분장 평가 | 유해오염물질의 유형, 제반인자, 지하수, 지표수, 대기질의 각종 인자 | 상 등 |
| 5. Site Rating Methodology | 상 등 | 이동경로, 폐기물특성, 폐기물관리방법, receptor(150), 부지 특성(3) | 상 등 |
| 6. Waste soil-site interaction matrix | 신설산업(고형, 액상) 폐기물처분장 평가 | 토양군(K, 흡착), 수문군(지하수위, I), 부지군(삼투율, 대수층, 비포화대) 폐기물특성 : Human toxicity, 지하수toxicity de-sease transmission, potential chemical persistance, biological pers, sorption, 점성, 수용성산도 및 알카리도, 폐기물살포 방법(45-4830) 등 | Oklahoma-정화조에 의한 지하수계오염 평가, 미국/EPA |
| 7. DRASTIC (pesticide) | 지하수수문환경의 오염가능성 평가(120,000평)(각종 산업, 유해폐기물 처분장, 석유화학단지, 공업관광단지 입지선정) | 지하수수문계와 비포화대의 특성, 토양특성, 심도, 강우함량, 대수층의 지질특성, 지형구배, 비포화대의 구성물질, K(23-226) | US EPA/AGWSE 지하수 오염가능성도 작성 |
| 8. PESTICIDE INDEX | 농약에 의한 지하수환경 오염가능성 우선순위 결정 | Rd,K(n), Q, to5, Kd, fac, Koc 등 이용 | |
| 9. 기타 농약 및 비료 살포 | 현재 등록된 농약, 농약사용신규 등록을 하고자 할때는 농약사용으로 인한 지하수계의 오염가능성을 평가하기 위한 초기선별과 정단계에서 EPA/OPP(Off of Pest, program)에서 널리사용 | PESTAN, SESOIL, PRZM, PESTRUN, SOIL 등의 전산 program 이용 | Aldocarb, 2-4-D,(Ban-vel) Enfield |

복잡한 mechanism으로 이루어져 있어 세부적인 서술은 불가능하므로 상기 지하수계를 단순화시켜 개념모델을 수행할 수도 있다. 개념모델시 지하수계의 현상태는 정역학적인 모델을 이용하여 서술하고 미래에 발생할 흐름변화를 예측키 위해서는 처리가능한 동력학적인 모델을 이용한다.

미국을 위시한 선진제국은 지난 70년대부터

많은 시간과 자금을 투자하여 지하수환경의 오염취약성 평가법을 잘 정립시켜 놓은 바 있다. 전술한 바와 같이 지하수평가방법에는 간접적인 평가법과 직접적인 평가법이 있다. 그러나 상기 평가법을 이용하여 고려대상지역의 지하수오염 취약성을 평가 판정키 위해서는 우선 그 지역의 수리지질학적인 수리분산특성이 완전히 파악되어야만 한다.

제주도 지하수 오염취약성

제주도 경우를 살펴보면 다소 미흡하나마 해발 200m이하 지역은 수리지질 특성 자료가 어느정도 구비되어 있어 전술한 방법을 적용하여 일부지역에 대하여 지하수환경의 오염취약성 평가를 시도해 보았다.

평가대상지역으로 평가에 필요한 수리지질학적 입력자료가 어느정도 구비된 제주시, 서귀포시 일원과 동부의 성산지역을 선정하여 기존의 간접평가방법중 미국 EPA에서 널리 이용하고 있는 DRASTIC방법을 적용하여 지하수환경의 오염취약성을 평가하였다. DRASTIC평가법은 대상지역의 지하수위, 강수에 의한 대수층으로의 함양율, 포화대수층의 구성물질, 평가지의 지형구배, 지표면에 분포되어 있는 최상위층인 비고결암의 구성물질과 투수성, 비포화대의 오염저감능과 구성물질 그리고 대수층의 투수성에 따라 지하수나 대수층의 오염취약성을 지수화(index)하여 평가하는 간접평가법이다. DRASTIC에 의한 평가결과 DRASTIC지수가 작을수록 지하수의 오염가능성은 낮고 DRASTIC지수가 클수록 오염가능성이 높다.

평가 결과 제주도의 조사대상 지역중 제주시일원의 DRASTIC지수는 최소 116점에서 최대 155점으로서 평균 129점이며, 성산지역은 130 - 187로서 평균 152점이었고, 서귀시지역은 101-163으로 평균 130점으로 나타나 제주시 및 서귀포시 일부를 제외한 제주도의 DRASTIC지수는 140점 이상으로서 오염취약성이 높은 것으로 나타났다. 특히 본도의 주대수층인 장석감암석현무암(FOB)이 분포된 구간에서는 DRASTIC지수가 152-185정도로 오염취약성이 상당히 크다.

외국의 지하수자원 보호관리기법

우리나라는 아직까지도 지하수환경에 대한 보호정책이 전무한 상태이기때문에, 선진외국의 사례를 검토 연구하였다. 지하수자원의 최적관리기법(Best Management Program : BMP)이란 먼저 오염으로부터 이를 사전에 보호하면서 최적상태로 개발이용하는 것이다. 일반적으로 지하수자원의 보호관리계획은 광역적인 보호와 국지적인 보호계획으로 대별되며 이를 미국의 예를 들어 세분하면 다음과 같다.

광역적인 보호계획의 예

(Regional protection strategy)

미국 연방정부는 가용한 물적 및 인적자원으로 지하수환경과 국민건강을 보호하고 추후 발생가능한 지하수환경의 오염을 방지하며 수리지질학적으로 주변 생태계와 연관이 있거나 현재 음용수로 이용하고 있는 모든 대수층을 오염으로부터 사전에 보호하기 위한 우선순위 결정 전략의 일환으로 다음과 같은 일을 수행하고 있다. (1) 주정부 차원 지하수 보호계획에 관련된 규제지침 개발과 조직적인 평가법 설정 및 지하수의 정보화 시스템 개발에 필요한 기술적 지원과 재원을 조달하며, (2) 현재까지 법적으로 규제되고 있지 않은 각종 지하수 잠재오염원의 규제법을 제정(UST/TSCA, 유해폐기물의 지하저장/RCRA, 가축분뇨 폐수/SDWA 등)과, (3) 지하수 보호 규제 지침서와 대수층보호계획 설정 등이다. 이러한 지하수의 광역적인 보호계획을 서술하면 다음과 같다.

함양지역(Area of Recharge)보호-분포암석의 투수성(수리지질), 토지이용상태, 개발정도, 식생, 유선망분석등에 따라 하향흐름이

우세하며 투수성이 크고 지하수 공급지역 할을 하는 투수성 지층 분포지역을 함양지역으로 지정 보호한다. 일반적으로 미개발지역은 특수한 경우를 제외하고는 이에 포함시켜 신규 토지이용과 개발행위를 금지하고 규제를 실시하여 이 지역을 오염원으로 부터 사전에 철저히 보호관리한다.

연방정부의 대수층 분류 - 현재 미국 EPA는 지하수보호의 주전략으로 지하수의 현이용량과 수질상태, 용수공급원으로써 잠재성과 토지이용 계획과 대수층의 수리특성, 종류와 수, 경제적인 개발가능량(Optimal yield), 잠재오염물질의 동화저감능 등 수리지질학적인 특성을 기준으로 대수층을 분류하여 대수층 분포지역상에서 수행되는 제반 사회, 경제활동의 조정, 규제를 위한 기준으로 이용하고 있다. 현재 미연방정부는 대수층을 다음과 같이 광역적으로 분류하고 있으며, 이용하고 있는 모든 대수층의 수질이 최고 양질의 수질기준을 유지토록 규정하고 있다. 즉, (1) 1급 대수층(Class I)은 오염취약성이 매우 크고 급수원으로 대체할 수 없는 특별 유일대수층(SSA)이고, (2) 2급 대수층(Class II)은 현재 및 잠재급수용 수원으로 사용가능한 모든 대수층(TDS 10,000ppm이하)이며, (3) 3급 대수층(Class III)은 상당히 오염되어 추후 식수원으로 사용불가능한 대수층(염수화 포함)이다.

유일대수층 보호계획(SSAP)과 대수층 보호지역(APA) - Texas/Austin지역은 파쇄가 심한 용식석회암으로 구성된 Edward 대수층이 분포되어 있으며 지표수계와 지하수계가 수리적으로 서로 연결되어 있다. 이에 따라 Edward 대수층 분포지역은 모두 지하수 함양지역에 해당하므로 유일대수층으로 분류하여

폐기물 처분장 및 폐기물 매립장 입지로의 사용을 금지하고 축사 sludge와 폐수의 방류를 금지할 뿐만 아니라 토지 이용과 제반 개발계획을 규제하고 개발 수행시에는 정부의 재정 지원을 유보하는 등의 유일대수층 보호계획(Sole Source Aquifer program)을 철저히 시행하고 있다. 이외에도 현재 미국 전역에서 유일 대수층으로 지정(1982.6, EPA) 보호되고 있는 대수층은 다음과 같다. 즉, 남부 Florida의 Biscayne 대수층, Guam의 전지하수계, New York의 Long Island 대수층, Montana의 Hellena valley 대수층, Washington - Idaho의 Spokane valley 대수층, Maryland의 Piedmont 대수층, Texas 및 New-Mexico의 Delaware 대수층, Oklahoma의 Verdegris Valley 대수층, New Jersey의 The Rockaway 상류대수층과 Buried Valley 대수층계, California/Fresno의 하부대수층 등이다.

광역적인 보호계획의 예

Connecticut과 Southington의 지하수계 분류 -

미국의 Connecticut와 Southington 지역에서는 Table 3과 같이 전체 지하수계를 현수질의 상태에 의거하여 4종으로 구분하고 분류된 지하수수역에 따라 그 용도와 그 규제 내용을 명시하고 있다.

Long Island의 지하수역 분류 - 미국 Long Island 지역은 지하수역을 다음과 같은 3가지로 분류하여 각각의보호전략을 수립, 시행하고 있다. 각 지하수역과 구분에 고려된 요소들의 상관관계는 Fig 1에 나타나 있다. 첫째, 공공급수용으로서 영구적으로 지하수원 확보가 가능한 지역을 "최상급 지하수수역(I 수

Table 3. Classification of groundwater system in the region of connecticut and Southington.

| 분류 | Connecticut | | Southington | |
|-----|---|---|---|--|
| | 용도 | 규제내용 | 분류 | 용도 |
| GAA | 공공, 개인급수용으로 처리하지 않고 음용가능한 수역 | 가축 및 인분폐수의 방류와 소규모 냉난방 및 각종 사용수의 방류제한 | GAA | 현재 음용수원으로 이용하고 있는 수원 |
| GA | 별도처리 없이 음용가능한 (개인용인 경우) 수역 | 가축 및 인분폐수나 처리하지 않고 이용할 수 있는 음용수수원에 각종 사용수의 방류제한 | GASS GA ¹ GA ² GB/GAA GA GA ³ | 음용수원으로 이용하고 있는 지표수체로 함양되는 대수층 잠재음용수원 GAA와 GA ¹ 구역 주위의 제2함양지역 오염되었으나 음용수로 사용가능한 지역 GAA, GA 및 GA ² 구역주위의 제한된 함양지역 |
| GB | 처리하지 않고서는 음용수로 사용하기 어려운 수역 (주로 기존 및 과거의 토지이용) | GAA, GA는 본 분류에 포함되고 이에 부가해서 주변부분으로 이용할 수 있을 시 처리된 산업폐수를 방류하기에 적절한 경우, 허락하는 의도는 토양 내에서 오염물질이 쉽게 생분해되고 여과되는 경우에는 오염물질을 방류하더라도 주후 처리하지 않고 지하수를 음용수로 이용하는 데 지장을 주지 않는 경우 수질저하 초래가 없는 경우 | | 오염되었으나 처리후 음용수로 가능한 경우 오염된 제2함양지역 |
| GC | 심히 오염되어 특정 오염물질의 처분지로 이용하는 것이 보다 적합한 수역 (주로 과거의 토지이용이나 공공, 개인용 급수원으로 개발하기 보다는 저유된 지하수가 허가된 오염처 분장으로 이용하기에 적합한 수리지질여건을 가진 곳) | 주변 지표수계의 수질저하를 초래하지 않는 경우로써 역시 주변토양과 지질이 지하처리 system으로 작용할 수 있기 때문 | | |

역)으로 지정하고 주 보호전략으로는 지방자치단체에서 광범위한 토지구매와 취득, 정부시설(위해 및 잠재오염원)의 이전, 모든 피복수림의 엄격한 보호, 세금 납부불이행 토지의 압류와 상향분류 및 주민교육 등을 시행하고 있다. 둘째로 수역내에서 토지의 혼용으로 인하여 장래 양호한 수질의 확보가

불투명한 급수원을 “양호한 지하수 수역(II 수역)”으로 지정하여 선별적인 토지구매, 상향분류나 본 역에서 기승인된 각종 개발사업의 재검토와 대규모 공공토지의 유보나 타규제나 승인 과정 등을 이용하여 본 수역내에서 지하수 수질의 저질화 방지와 주민교육등을 주 보호전략으로 채택 시행하고

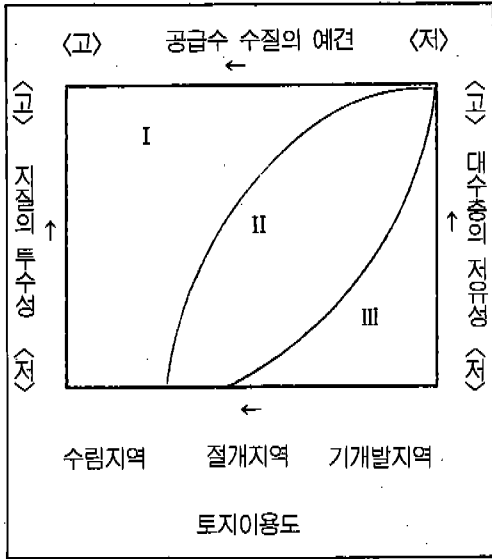


Fig.1 Classification of groundwater region

있다. 마지막으로 자연적인 수역 특성을 상실하여 장기적인 수질의 저질화를 초래한 급수원을 “저질의 지하수 수역(III수역)”으로 구분하여 오염된 지하수를 음용수용이 아닌 타용도(농.잡용수)로 전용하되 그 주변에 잠재오염원이 없는 경우에만 허용하며 주민교육과 병행하여 타 규제지침이나 인허가과정을 통하여 수역의 수명을 보전토록 하고 있다.

미국의 각 주별 지하수환경의 분류기준- 미국의 각 주에서 지하수자원을 분류하고 있는 기준을 요약하면 Table 4와 같다.

특이한 사실은 TDS가 10,000mg/l인 blackish water도 보호대상으로 하고 있는 점이다. 이러한 사실은 현세대의 기술로는 TDS가 10,000 mg/l인 blackish water를 음용수로 처리하려면 상당한 경비가 소요되지만 후세대의 기술로는 보다 경제적으로 이를 처리 이용할 수 있을 것으로 믿기 때문에 이를 보호하고 있다.

국지적인 지하수보호계획

(Local prostrategy)

1986년에 수정된 미국의 안전음료수법(SDWA)에 의하면 미국의 각 주정부에서는 모든 공공급수용 취수정을 오염으로부터 보호하기 위해서 취수정 보호계획(WHPA)를 적용토록 법적조치를 취한 바 있다. 그런데 각 주정부는 주 자체의 취수정 보호구역을 규정하는데 있어서 주 고유의 특수한 수리지질 특성때문에 상당한 유연성을 가지고 이를 적용하고 있다. 즉, 각 취수정의 영향추(cone of depression)나 상하류 구배구간의 공헌구간(Zone of contribution ; ZOC)이 포함된 정교한 전산 mapping program에서부터 단순한 완충구역(Buffer zone) 설정에 이르기까지 그 형태가 매우 다양하다. 영향권(ZOI)과 공헌구역(ZOC)을 정확히 규정하는 일은 취수정 보호에 매우 중요한 과제이다. 왜냐하면 오염원이 음용수나 제품용수(drink 류나 광천음료수)의 취수정에 인접해 있을수록 취수정을 통해 오염물질이 채수될 수 있는 시간이 짧으며 대수층내에서 오염물질이 동화,저감될 수 있는 기회가 적어져 이들 구간 내에 존재하는 오염물질이 쉽게 취수정을 오염시킬 수 있기 때문이다.

지하수와 오염물질이 취수정에 도달할 수 있는 시간을 도식화한 것을 시간관련 포획 구간도(Time related capture zone)라 한다. 이러한 시간관련 포획구간도는 취수정에 오염 위협을 주는 수질 평가나 신규 취수정 설치 규제방법으로 사용할 수 있다. 본 도식법은 미국을 위시하여 EC에서 국지적인 지하수관리 program으로 널리 쓰고 있는 매우 유용한 접근법으로서 민감지역 설정에도 널리 이용

Table 4. State and Territory Groundwater classification System in USA

| 주 | 분류수 | 분 류 기 준 |
|----------------|-----|--|
| Connecticut | 4 | 수질, 토지이용, 지하수흐름계(GAA, GA, GB, GC) |
| Florida | 4 | 유일대수층과 음용수원대수층 최우선 보호 |
| Hawaii | 2 | 담수와 염수 |
| Idaho | 2 | 특별수원 : 사회, 경제적인 인자가 중복되지 않을시 저질화에 따른 보호 식수원 : 무처리로 음용가능토록 보호 |
| Illinois | 4 | 용도별로 분류 : 생활용수와 기타 용수 |
| Iowa | 6 | 수리지질학적 특성을 고려하여 오염에 대한 취약성에 기초 |
| Kansas | 3 | 담수, 이용가능한 수자원 및 고염도 지하수 |
| Maine | 2 | 식수원으로 적합 식수원으로 부적합(brine water) |
| Maryland | 3 | TDS에 의거 분류 Fresh 0- 1,000mg/l Blackish 1,000- 1,000mg/l Saline 10,000- 100,000mg/l(Cl : 350, NaCl : 650) Brine 100,000mg/l이상 |
| Massachusetts | 3 | 음용수수질, Saline, 음용수수질로 부적합 |
| New Jersey | 4 | TDS에 의거 분류 |
| New Mexico | 2 | TDS가 10,000mg/l이하인 지하수는 보호하고 TDS가 10,000mg/l이상인 지하수는 기준에서 제외 |
| New York | 3 | 담수형 지하수, 고염도지하수 (Cl-이 1000mg/l이상, TDS가 2000mg/l이상) |
| North Carolina | 5 | 주용수원인 담수형 지하수(GA) 지하수나 지표수를 함양시키는 지표면하 6.1m이내의 심도에 부존된 중염도 지하수 (Brackish water) 지하수나 지표수를 함양시키는 지표면하 6.1m이하에 부존된 중염도 지하수 기술적으로 경제적으로 고수질의 물로 처리 불가능한 오염된 지하수(GC) |
| Vermont | 2 | 지방자치단체의 공공급수원으로 이용가능한 지하수와 그렇지 못한 지하수 |
| Wyoming | 7 | 가정용, 농업용, 가축용, 어업용, 탄화수소계열 및 광산용 기타 용도에 부적합한 지하수 |

되고 있는 바 일반적인 설정기준은 다음과 같다.

정호장 주위의 영향권

공공급수정 주위에는 US/EPA에서 설정한 취수정보호계획(Well head protection program ; WHPA)에 의거하여 민감지역을 설정한다. 예를 들면 Florida 주의 Dade Broward County에서는 1986년 SDWA/WHPA에 의거

하여, 각종 Virus나 Bacteria의 지하수계(비포화대 포함)내에서 생존 기간과 장기적인 강우기록중 최대 연속 갈수지속일수와 실 지하수위 강하량이 1m되는 지점까지의 거리중 큰 거리를 영향권으로 설정하고 있다.

정호장 인근 대수층 보호구간

정호장 인근의 대수층 보호를 위하여 지하수자원의 보호목적에 따라 다음과 같이

민감지역을 구분하여 설정한다. (1)정호장 완충구역(Well Buffer area)은 7일 양수시 영향권과 1년 포획구간(capture zone)중 큰 거리에 해당하는 지역을 최우선 보호구역인 완충구역으로 설정하고 취수정 보호계획(WHPA)을 적용한다. (2)정호장의 함양보호구역(Recharge protection area)은 기존 및 잠재 정호장으로서 강우가 직접 함양되는 지역으로 투수량계수(T)가 $620\text{m}^2/\text{일}(5000\text{qpd}/\text{ft})$ 이상인 중규모의 지하수자원 개발가능지역이며 (3)정호장의 대수층 보호구역(Aquifer protection area)은 상기 두 지역을 제외한 지표면에 투수성 사력층이 분포된 상류구배 구간의 잔여 대수층 분포지역이다.

국지적인 지하수 보호계획의 사례

Boston의 북서부 48km지점에 위치한 Massachusetts 주 Acton지역은 1970년부터 급격한 경제성장에 따라 1980년대에 인구가 17,544명으로 급증하여 90년대에는 약 $3,800\text{m}^3/\text{일}$ 의 용수부족이 예상되었다. 이 지역은 주 급수원을 인근에 분포된 빙하퇴적층내에 부존된 지하수에 의존하고 있어 지하수자원의 관리보전대책이 필수적인 지역인데 1976년도에 인근 화학공장에서 취급한 합성 유기화합물질의 누출로 취수정이 오염된 바 있다. 이에 따라 다음과 같이 세부수리지질조사를 3단계로 실시하고 그 결과에 의거하여 지하수 보호계획을 수립하여 시행하고 있다.

제1단계 조치로 3가지 유형의 민감지역을 설정하였다. 첫째로 최우선 보호구역으로 기존 취수정이나 잠재정호장 예정지역을 대상으로 7일간의 영향권과 1년간 이동거리(TOT)중 큰거리를 채택하여 정호장 완충구역(Area 1)을 설정하였다. 제 2 우선 보호구역은 기존

및 잠재정호장으로 직접 함양되는 지역으로 투수량계수 $T > 620\text{m}^2/\text{일}$ 로서 오염물질이 정호장으로 유입 도달될 수 있는 지역을 정호장 함양 보호구역(Area 2)으로 설정하여 잠정적으로 소규모의 개발은 허용하되 토지 이용시 강력한 지하수 오염원 규제법을 적용토록 하였으며, 광역적으로 보호해야 할 필요성이 있을 경우에는 제 3 민감지역을 설정하는데 투수성이 양호한 대수층의 전체 분포지역(기개발된 지역 포함)을 정호장 주위 대수층 보호구역(Area 3)으로 설정하여 보호토록 하였다(Table 5).

제2단계는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 대하여 SDWA(안정음료수법)의 음용수기준($10\text{mg}/\text{l}$ 이하)을 적용하여 지하수의 시료 채취 및 modeling을 실시하였다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 을 modeling item으로 사용한 이유는, $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 주변 지질에 거의 흡착되지 않으며 TDS, Cl, 인 등에 비해 지하수 오염의 중요한 지시인자(특히 정화조에 의한 지하수 오염 예측시)로서 국민건강에 매우 중요한 수질성분인자이며 수처리가 용이하지 않다는 점 등의 이유때문이다. Modeling 분석시 하천 기저유출량은 전적으로 지하수배출에 기인하며, 기저유출에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도는 집수유역내의 가옥 수에 비례하는 것으로 가정하였다.

제3단계는 지하수 관리계획과 규제법을 제정하여 보호구역을 설정하고, 각 민감지역내에서의 관리기법을 설정하였는데, 그 규제지침의 주요 골격은 (1)음용수 수질기준에 의거하여 유해물질취급과 유류 저장소(주유소 포함) 설치를 규제하고, (2)대수층을 그 수리성에 따라 보다 세분화하였으며, (3) $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 modeling 결과에 따라 주거수와 정화조의 수를 제한하거나 토지이용 개발계획을

Table 5. Land use controls in sensitive area around intake well after designation of protection area

| 이용 형태 | Area 1 | Area 2 | Area 3 |
|--|--------|--|--|
| 주거 이용 | NP | 1가구/2500평 | 1가구/1250평 |
| 산업 용 | NP | NP | 방류시 경계선에서 수질이 반드시 음용수 수질에 적합한 경우만 특별허가. PS적합 |
| 상업 및 service용 | NP | 정화조를 제외한 폐수방류 금지. 이때도(정화조) 음용수 기준 이내. | 방류시 경계선에서 수질이 반드시 음용수 수질에 적합한 경우만 특별허가. PS적합 |
| 토지의채굴, 석재채석 | NP | NP | 년간 3m이상 굴착 불허 PS적합 |
| 1250평당 25마리 이상 가축 사육장 (animal feed lot) | NP | NP | 수질기준에 적합한 경우 허용, PS적합 |
| 독성 및 유해폐기물의 처분, 저장, 운송, 사용, 제조 | NP | NP | " |
| 잡목림(bush)이나 그루터기(stump)가 아닌 고�형폐기물 처분, 위생매립장, 고물집적소(junkyard) 및 폐집적소, 자동차서비스, 수리소세차장, 화물 터미널 주유소 | NP | NP | NP |

조정하였으며, (4) 기타 오염원에 의한 대수층 오염방지 등이다.

각 민감지역별 규제내용을 살펴 보면, 정호장 완충구역(Area 1)에서는 소규모 저장도의 토지이용(기존 시설물 포함)은 허용하되 난방용으로 기존 건물에서 사용하고 있는 것 이외에는 유류나 기타 화학물질의 저장탱크와 같은 보조시설 사용을 전면 금지하고, 본역 내에서 제설, 제빙제 저장소, 농약 및 비료 살포를 금지하며 유독성 화학물질의 야적을 금지토록 하였으며, 토지이용 개발이 주변 지하수환경에 미치는 영향이 미미하다고 판단되는 경우에만 토지이용을 허용토록 하였다 (Table 5).

정호장 함양 보호구역(Area 2)에서는 완충 지역보다는 덜 엄격하지만 주거밀도가 낮은 주택개발정책과 같은 선별적인 토지이용만 허용하고, 오염물질의 방류 (각종 산업 및 축산 폐수등)는 철저히 금지하며 산업용, 도로

제설 및 제빙제, 가축 사육장, 고�형폐기물 처분, 유해물질 이용, 자동차 정비소와 같은 소규모 오염물질 배출 유발 시설(SQG)사용을 전면금지토록 하였다. 또한 본역내에서 개발을 시행코져 하는 자는 개발이 주변의 기존 및 잠재 취수정에 미치는 영향에 대해 수리지질영향 평가서(Hydrogeologic impact assessment)를 제출토록 요구하고, 그 외 농약이나 비료 살포시 반드시 허가를 받도록 규정하였다. 대수층 보호구역(Area 3)에서는 보다 완화된 규제를 적용하여 유해물질의 사용이나 고�형폐기물 처분을 전면금지하고 기타 개발은 특별허가(permit)를 받도록 규제하여 산업 및 상업폐수와 비위생폐수를 방류(Nonsanitary wastewater discharge)시 방류지역내 지하수의 수질이 SDWA 기준을 유지할 수 있고 관련 기준에 부합되는 경우에는 인가토록 하였다. 부지정리, 일정 규모의 토지굴착허가나 토지복토시, 유해폐기물이 발생할때는 수리지질영

향평가서에 의거하여 인가 여부를 결정토록 하였다.

지하수자원 보호전략 (하와이주의 경우)

하와이는 국내 제주도과 유사한 지형지질 조건을 갖고 있는 화산도로서 제주도보다 약 100년 앞서 지하수 개발을 시행해온 지역으로써 하와이의 지하수자원 개발과 관리 보전 연혁과 보호전략을 상술하면 다음과 같다.

하와이 지하수자원의 개발 보전 연혁

하와이는 도내에 부존되어 있는 지하수의 산출상태와 그 관리 보전 기법을 수립하기 위하여 1920년대부터 현재까지 약 70년 이상 꾸준한 조사, 연구를 수행하고 있다. 하와이는 1929~1930년부터 지하수자원의 중요성을 관계기관과 주민이 절실히 인지하고 용수의 적정 이용과 절약 및 보전에 부단한 노력을 기울이고 있다. 그러나 지하수자원은 타 수자원에 비해 가시적이지 못하고, 이방성(anisotropy) 및 불균질(heterogeneity)한 매체내에 부존되어 있다는 특수성때문에 이를 정량적으로 규명하고 최적으로 관리 보전하는데는 상당한 노력과 시일이 요구된다. 제주도보다 약 100년 이전부터 지하수를 개발 이용한 하와이군도에서 이러한 지하수자원의 조사 개발 및 관리 보전 연혁을 간략히 요약하면 Table 6과 같다.

하와이 대수층의 특징

하와이의 지질은 주로 평균 3m 두께의 pa-hoehoe 용암류와 aa 용암류가 공존하는 현무암류로 구성되어 있으며 이를 피상이고 치

밀한 blue rock 암맥이 관입하고 있다. 주대수층은 용암류간에 협재된 clinker이다. 한편 해안변을 따라 소위 cap rock이라 불리우는 퇴적암류가 분포하여 피암대수층이 잘 발달되어 있는데, 이 지역에서는 이러한 퇴적암류가 오염물질의 하방침투를 방지하는 자연적인 방벽 역할을 하여 양질의 음용수원이 되고 있다.

취수시설로는 관정이 대중을 이루며, 그 외에도 기저지하수의 최상위 부분에 설치하여 지하수 함양량만을 개발 이용하는 Infiltration gallery와 고지대의 이른바 암맥지하수(dyke-impounded water)를 개발한 상위 터널(ditch tunnel)등이 있다. 하와이 대수층의 광역적인 수리전도도는 대체로 304~1/608m/일이고 투수량계수는 114,330m²/일정도이며, 저유계수는 0.1 정도이고 동수구배는 0.00025정도이다. 취수정 공당 채수량은 평균 3,780m²/일이며 지하수 채수시 수위강하량은 0.3~0.7m이다. 그리고 비양수량은 6,200~12,400m²/공정도로서 투수성이 매우 양호한 대수층으로 구성되어 있다.

하와이 지하수 보호전략

1920년대부터 하와이는 지하수자원 보호정책을 수행하고 있다. 특히 하와이의 주도가 있는 Ohau도는 현재 지하수보호선을 강우량이 많고 미개발지역인 고지대를 주 지하수 함양지역으로 규정하여 내부보호선(Inner protection line)을 설정하였다. 이 지역내에서 토지이용과 개발행위, 특히 주거지로서의 이용과 모든 잠재오염원을 전면 규제하고 있다. 또한 내부보호선과 외부보호선(UIC Line)사이 구간은 자유면대수층 분포지역으로 비점오염원에 대한 보호가 절실한 지역이다. 따

Table 6. History of groundwater management in Hawaii

| 년도 | 조사자 | 내용 |
|-----------|---------------------------------------|---|
| 1778 | COOK | COOK선장일행이 HAWAII 서부 정착. 풍부한 수자원이 부존되어 있음을 확인. wai=water, waiwai=변영, 풍부 부(waikiki) |
| 1879 | J.Asley | 67m 굴착하여 피암대수층 발견. 당시인구 14,000명 그 후 인구 2배 증가 |
| 1880 | A.D Marques | 사탕수수 재배용 관정 3개공 굴착 |
| 1889 | Schuyler, Allied | 초기 용천 유출량 측정(284,000m ³ /일) 초기 우물현황 조사 Oahu도에 관정 굴착 개수가 430개소로 급증 사탕수수 100에이커당 3800m ³ /일 용수 필요 4000에이커 사탕수수 재배 초기(1987년)의 지하수위는 $\pm 13m$ 였는데 30년 사이에 지하수위가 4m이상 강하 하천 및 유출량 감소 |
| 1915 | | 사탕수수처리 전공장 완공 인구는 1989년에 비해 3배 증가 Honolulu 수자원 위원회는 "모든 수자원은 보호되어야 한다"고 역설 |
| 1926 | | 최갈수기, Oahu에서 물 문제가 사회적인 Hot issue로 대두 |
| 1929-1930 | B.W.S | Hawaii 수자원 기구 설립(Honolulu 하수 및 수자원위원회 개칭) 수역보호를 포함한 BMP기법을 응용하여 지하수 자원을 관리 인구 : 140,000명, 물값 : 2.5Cent/m ³ 하와이 용수계획, 개발 및 보전 계획 1955년까지 장래 용수-지하수개발 계획서 작성 |
| 1935-1938 | Stearns, Vokvik/USGS | Oahu 남부의 지질분포, 초기강우량과 지하수평가, 하와이 광역수리지질의 지침서, 용천-피암용천 |
| 1942-1951 | Wentworth/USGS | 용천-자유면 지하수의 배출지점, 지하수 수리학을 응용하여 강우, 초기지하수위 채수량과의 관계식 정립, Schuyler보다 세부조사 시행, 물수지분석 실시, 정량적인 조사를 수행한 수리지질학자 |
| 1946-1959 | Parmex/지질학자 (BWS) (Honolulu 하수 및 BWS) | Hawaii 지하수의 강우와 허부대수층과의 직접적인 관련성 제시 하와이 전도대상 장래 용수수요에 따라 용수개발계획수립을 위한 정량적인 조사 수행, 지하수위 강하와 염수 침입에 관련된 규제법 제정 |
| 1963-1964 | 수자원위원회 승계 Visher/Mink | Oahu-1980 water plan에 관한 1980년 까지의 master plan 작성(1980 master plan이라고함) Oahu의 안정채수량 계산, 지하화학적 평형, 용천의 흐름 mechanism조사, 기지지하수체의 수리학 정립 |
| 1967-1971 | Date, Edward/USGS | 1935년에 수행된 조사자료 재검토, 수문평형에 의거 물수지 분석 1960-1975 : 인구 증가율 2.3%/년 물이용 증가율 5.6%/년 1인 1일 급수량 75ℓ |
| 1971-1975 | BWS BWS | 이때까지 지하수의 화학적 처리는 불필요했으나 염소처리는 철저히 시행(소요비용 500만 \$/년) 기준 : 250ppm, Saipan : 500ppm, Hawaii 상수도에서 허용량 : 30-90ppm 1980 master plan을 재수정하여 2020 master plan수립 1980 master plan을 새로운 자료, 연구결과 및 신기술을 접목하고 측정인구 및 용수 수요에 따라 2020 master plan을 재수정하여 Oahu water plan이라 명함. |
| 1979-1979 | Saraos/Edward/BWS/Honolulu | 물수지분석 재시행 Oahu 인구 : 700,000명 인구밀도 : 479명/km ² 사탕수수 : 905,600m ³ /일 사실관정 : 132,000m ³ /일 단 시 설 : 113,000m ³ /일 상 수도 : 1,180,000m ³ /일 |
| 1975-1976 | B.W.S | 갈수기로서 년평균 강수량의 80-85% 강화 지하수위 자동관측 설치 및 관리기법 적용 |
| 1977 | B.W.S | 100% 물질약 캠페인을 벌인 결과 1인 1일 급수량이 816-76ℓ로 격감, 물사용료 : 17 Cent/m ³ |
| 1978 | B.W.S | 지하수 자원의 보호 정책 수행 |
| 1980 | Mink와 BWS | 하와이 지하수의 정량적인 산출상태, 물수지분석을 analytical model로 시행 |
| 1982 | BWS | 하와이 지하자원의 일반적인 관리계획과 보존대책에 대한 summary report |
| 1983 | BWS | pineapple농장에서 사용한 농약에 의해 DBCP, EDB와 같은 유기화합물질이 Trace amount로 발견 |
| 1991 | Mink/Aou/Oki | 주거지역에서 사용한 살충제(methibuzine), 기타 제조제인 독성유기화합물질이 Oahu의 Waiolama부근의 122m 하부의 지하수면까지 이동 검출 |
| 1991 | Lau/Mink/BWS | 하와이의 극지적인 지하수보호 program안 제시 |

* BWS : Board of water supply/Honolulu

라서 어떠한 오염물질도 주입할 수 없도록 본 line 내부지역을 음용수로서 지하수원 개발가능지역으로 설정하였다. 해안지역에는 음용불가능한 중염도 지하수(brackish water)가 부존되어 있어 UIC Line을 해안선에 근접하여 보호선을 설정하고 점오염원의 설치를 규제(Outer Line)토록 하고 있다. 그러나 본 지역은 기계발전 지역으로서 수십년 동안 영농과 중요한 도심지로 이용되고 있어 보호계획 시행에 다소 어려움을 겪고 있으며 전술한 내부보호선 지역보호에 주력하고 있는 실정이다. 예를 들면 지속산출량(Sustainable yield)이 1,356,000m³/일 정도되는 진주만 대수층이 이 지역에 분포되어 있다.

하와이에서 발생한 주요 지하수 오염현상은 다음과 같다. Pineapple 농장에서 30년전부터 처음 사용하기 시작한 토양훈증제(fumigant)에 의한 지하수 오염에 의하여 1983년 DBCP나 EDB와 같은 유기화합물질이 trace amount로 발견되었고, Diazinon이나 주거지역에서 사용한 살충제 Tribuzine과 골프장에서 사용한 제초제인 독성 유기화합물질이 Ohau의 Waiama부근에서 122m 하부의 지하수면까지 이동되어 검출된 바 있다(1991, Green et al.). 따라서 현재 Hawaii는 지하수 자원의 보호와 도시 및 농업용 토지개발의 고전적인 딜레마에 직면하고 있으며 특히 후자는 잠재 비점오염원을 이루고 있어 사안의 해결을 더욱 어렵게 하고 있다. 그 해결방안으로 토지이용의 최적관리기법으로 이를 해결키 위해 보다 강력한 규제조치를 검토중에 있다. 뿐만아니라 주거지에서 사용한 각종 유기용제(solvent류, TCE, benzene등)의 방류에 따른 규제조치가 절실(탐지가 매우 어렵다)한 실정이라고 한다. 이에 따라 1920

년대부터 지하수보호정책을 시행해온 하와이도 현재까지 합리적인 수자원 보호 방안에 대하여 지속적으로 조사 연구를 하고 있는 실정이다. 최근까지 검토되어온 취수정 보호지역(Well head area), 대수층 보호전략과 WHPA 규명을 위한 기준과 방법 등 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

WHPA(Well head protection area)접근법 - 미 연방정부의 EPA에서 WHPA를 각 주정부가 적용 제시토록 한 목적은 지하수 함양지역(ZOC) 보호와 예견치 못한 오염물질의 누출시 처방을 위한 충분한 대응시간 확보와 오염물질이 취수정에 도달하기 이전에 자연적인 저감작용에 의해 적정 농도기준까지 오염농도를 저감시키기 위해서이다. 이러한 목표를 달성키 위해서는 WHPA 기법을 이용하여 상당히 넓은 면적을 보호해야만 최대한 지하수자원을 보호할 수 있는데, WHPA를 규명키 위한 기준은 다음과 같다.

지하수강하량에 따른 보호지역 설정 : 광역적인 흐름장에서 지하수위 강하량에 따라 설정한 영향지역(ZOI; Zone of influence)은 보호가 불필요한 지역까지 광범위하게 포함하며, 최악의 경우에는 이 방법으로는 전 함양지역을 해결할 수 없는 경우도 발생한다. 또한 투수성 지역은 실수위강하량이 매우 작으므로 실제 수위강하량을 측정하기가 불가능할 정도이다. 따라서 지하수위강하량에 따라 보호지역 기준을 설정하는 데에는 상당한 무리가 따른다.

동화능력에 따른 보호지역 설정 : 동화능력은 전적으로 유입된 오염물질과 대수층의 저감작용에 의해 동화되는 능력에 의존한다. 따라서 저감작용이 일어난다고 하더라도 신뢰성이 있는 측정과 예측이 어렵고 경비가

많이 소요된다. 특히 하와이는 아직까지 분배계수, 지연계수(retardation factor)나 분산지수와 같은 기초적인 수리분산특성 인자가 규명되어 있지 않아 정책적인 관점에서 볼 때 동화능력을 이용시에는 오염을 도리어 촉진시키거나 면피부 노릇을 할 수도 있으므로 이 기준을 적용한다는 것은 현재상태에서 시기상조이다.

함양지역의 흐름경계와 거리규정에 의한 보호지역 설정 : 과학적으로 함양지역을 완전히 규정할 수 있는 방법은 흐름경계(flow boundary)를 철저히 규명하는데 있다. 따라서 지하수 흐름경계를 기준으로 하여 보호구역을 설정하는 것이 가장 양호한 접근법이라 할 수 있다. 대체적으로 1개의 기준을 적용하여 거리 접근법으로 전체 함양지역을 보호하거나 이에 부합되는 지역을 설정한다는 것은 불가능하나 거리개념은 최소 이격지역을 설정하는데 매우 유용한 기법이다. 하와이는 이미 Outer Line인 UIC Line을 이용하고 있으며, 신규 주입정은 음용수원으로부터 최소 400m 떨어진 곳에 설치토록 규정하고 있다(HRS chapter 2). 이는 단계별 접근법(phase approach)으로 단순한 거리개념을 도입해서 이용하는 매우 유용한 접근법이다(1987,EPA). 단계별 접근법은 가장 간단한 기준으로 WHPA를 설정토록 제시해주고 그 후에 보다 정교한 기준으로 바꾸어 쓸 수 있다.

오염물질의 이동시간(TOT) 개념에 의한 보호지역 설정 : 오염물질의 적절한 반응시간에 부합되는 TOT의 계산과 이에 따른 오염된 지하수의 처리대책 수립에는 TOT가 가장 보호목적에 부합되는 기준이다.

대수층 보호지역(Aquifer protection area, APA)설정 - 현재 하와이는 대수층 보호지역

설정 기법으로 뉴욕 주나 메사츄세츠 주의 Spokane에서 사용하고 있는 새로운 지하수 보호 접근법인 APA(Aquifer protection area)를 고려중에 있다. APA란 급수용으로 지하수를 채수하는 대수층의 전 지표분포지역을 의미하는 것으로서 전 대수층을 보호하기 위한 접근법이다. 즉, APA는 지하수 흐름 경계 기준과 일치하며, 대수층에 설치한 각 관정에 따른 모든 WHPA를 포괄적으로 포함하는 것으로서 WHPA에 비해 다음과 같은 특성을 갖고 있다.

APA는 WHPA에 비해 보다 확실하게 고정경계선을 설정할 수 있고, 지하수 채수 또는 함양량 변화에 따라 WHPA 경계선은 변경될 수 있으나 APA 경계선은 이에 영향을 받지 않는다. 또한 WHPA 경계선은 분산작용에 의해서 불분명할 경우가 발생하나 APA는 영향을 받지 않을 뿐만 아니라 WHPA보다 APA의 수가 적기 때문에 관리가 매우 단순하다. 한편 APA의 주 장애요인은 과잉규제로서 초기 개발기간동안에는 보다 넓은 지역을 규제해야 한다는 단점을 갖고 있다. 그러나 하와이의 대수층은 분포면적이 협소하고, 투수성이 크며 고산출정이 많기 때문에 APA가 가장 적합한 보호기법이 될 수 있다. 이러한 수리지질환경하에서는 1개 정호장이나 여러개의 정호장이 대수층 전체에 영향을 미칠 수 있어 과잉규제에 대한 논란의 소지가 적다.

WHPA나 APA를 시기별 단계별로 적용하는 것도 한 규제방법이 될 수 있다. 즉 지하수 개발초기에는 WHPA를 적용하고, 후기에 가서 APA로 전환하는 것으로서 여기에서 후기란 대수층으로부터 지하수개발량이 지속산출량(Sustainable yield)에 도달하는 때를 의미

한다.

하와이는 일정지역에서 양수량이 지속산출량의 90% 이상에 달하게 되면 주정부에서 전지역을 대수층 보호지역으로 지정하고 수원보호를 위한 규제를 시행하고 있다.

하와이 지하수자원 보호를 위한 대수층 분류기준과 지하수보호코드(1990)-지하수 보호 전략의 일환으로 하와이는 주내에 속해 있는 각 도서의 대수층에 대한 구분과 주요 대수층을 일련번호(code)로 분류하는 사업을 시작한 바 있다. 여기에서는 하와이군도중 Maui섬의 대수층코드(Aquifer code)와 대수층상태 코드(Status code)에 대하여 언급코져 한다.

대수층코드는 그 위치와 서술적인 지표(descriptive indices)를 나타내 주는데 반해 대수층상태코드는 대수층의 개발정도, 활용도, 수질 및 유일성(Uniqueness)과 지하수의 오염 가능성을 표시한다. 이와 같은 코드는 미국 EPA가 제정한 DRASTIC 접근법보다 더 하와이 자체의 지하수의 산출상태와 유동에 맞게 제정하였다.

대수층 분류와 대수층 코드(code) : 대수층 코드는 각 대수층 형태별로 부여된 8자리 수자로 이루어진 것으로 하와이주내에서는 유일한 숫자이고 서로 중복되지 않도록 했다. 대수층코드와 더불어 대수층상태코드는 5자리 숫자로 이루어져 있는데 이는 한개의 대수층코드에 대해 유일한 숫자이다. Maui섬의 분류체계는 6개의 대수층구역(Aquifer sectors)과 25개의 대수층계(Aquifer systems), 그리고 113개의 대수층번호(Aquifer codes)로 이루어져 있다. 분류체계는 각 도서와 구역(sector)과 같은 일반적인 위치로부터 시작해서 다양한 종류의 대수층들을 포함하고

있는 일련의 대수층계(Aquifer system)까지를 포함한다. 각 구역은 첫째로 광범위한 수리지질학적 특성들을 나타내고, 둘째로는 지형 특성을 나타낸다.

대수층계는 지층내의 수리적인 연결과 같은 수리지질학적 연결성에 따라 좀 더 구체적으로 표현한다. 대수층의 종류는 여러가지 수문학적 및 지질학적 양상에 따라 구분되는데 이들을 간략히 설명하면 다음과 같다.

(1) 도서(Island)-광범위한 인자, (2) 구역(Sector)-유사한 수리지질학적 특성을 갖는 비교적 넓은 지역, (3) 계(System)-구역내에서 수리지질학적 연결성을 지니고 있는 지역, (4) 종류(Type)-동일한 수문학적, 지질학적 형태를 갖인 대수층계(system)내의 한 부분 등이다.

미국지질조사소에 의해 제정(1976)된 하와이주 정호 일련 번호체계(Well numbering system)의 첫번째 숫자에 따라 각 도서의 코드가 정해지며, 구역은 하와이의 지형명에 따라 2자리의 숫자가 부여된다. 대수층계에도 2자리의 숫자를 부여하는데 이들 역시 지형명을 나타낸다. 대수층의 종류는 3자리의 숫자를 부여하며 기본적인 지하수 수문학과 지질학에 대한 사항을 나타낸다. 따라서 전체숫자코드는 1-01-01-111과 같은 형태를 가지는데, 여기서 첫번째 숫자는 각 도서(Island), 다음에 두 숫자는 구역(Sector), 그 다음 두 숫자는 대수층계(system), 그리고 마지막 세 숫자는 대수층의 종류를 나타낸다. 각 도서는 섬의 이름에 따라 1번 부터 8번까지의 숫자를 부여하고, 구역은 각 도서에서 01부터 시작하며, 대수층계는 다시 각 구역에서 01부터 시작한다. 지하수 수문학적인 사항은 한쌍의 숫자로 표시하고 지질학적 사항은

Table 7. Classification of aquifers and their hydrogeologic codes in Hawaii

| 번호 | 종류 | 특징 |
|----|-----------|--|
| 1 | 기저대수층 | 염수와 접촉되어 있는 지하수 |
| 2 | 상위대수층 | 염수와 접염수와 접촉되어 있는 지하수 |
| 1 | 자유면대수층 | 포화대수층의 최상단면이 지하수면인 대수층으로써 지하수면에서 압력은 대기압과 동일할때 |
| 2 | 피압대수층 | 지하수위가 포화대수층의 최상단면보다 위에 있는 지하수로서 포화대의 최상단면에서 압력이 대기압보다 클때 |
| 3 | 피압 혹은 자유면 | 실제 대수층의 상태가 확실치 않을 때 |

한자리 숫자로 표시한다. 코드의 숫자가 나타내는 특성은 다음과 같다.

지하수 수문학적 코드 : 대수층의 종류는 다음 (Table 7)와 같이 구분한다.

위의 코드를 이용하여 나타낼 수 있는 지하수 대수층의 형태는 11(기저,자유면), 12(기저, 피압), 21(상위, 자유면)또는 22(상위, 피압)등이다. 피압상태가 불분명한 경우는 두번째 숫자를 3으로 한다.

지질학적 코드 : 대수층은 화산들의 flank lava, 암맥(dikes)으로 특징지워지는 rift zone과 난대수층, 부유지하수 및 퇴적층 등으로 구분된다. Flank aquifer들은 일반적으로 수평적으로 넓게 분포하며 지하수위가 가장 낮고 대개 기저지하수를 이동시킨다. Rift aquifer는 암맥에 의해 세부구획으로 다시 구분되며 부유대수층은 저투수성 지층위에 국부적으로 부존되어 있어 그 범위가 넓지 않다. 퇴적기원의 대수층들은 침식과 생태학적 작용에 의한 충전기원과 해성퇴적층으로 이루어져 있다. 지질학적 코드는 (Table 8)과 같다.

Table 8. Geologic codes of aquifer system in Hawaii

| 번호 | Type | 설명 |
|----|----------|--------------------|
| 1 | Flank | 수평적으로 넓게 퍼진 용암 |
| 2 | 암맥 | 암맥구간에 발달된 대수층 |
| 3 | Flank/암맥 | 구분이 불분명할 경우 |
| 4 | 부유지하수 | 불투수층위에 분포되어 있는 대수층 |
| 5 | 암맥/부유상태 | 구분이 불분명함 |
| 6 | 퇴적암 | 화산기원이 아닌 것 |

위의 숫자코드중의 하나가 2자리의 숫자로 이루어진 지하수 수문학적 코드(Table 7)에 연결되어 1개의 대수층 종류를 표기한다. 각 도서 코드로부터 지질학적 코드까지 부여되는 모든 숫자들의 배열을 대수층 코드(Aquifer code)라고 부른다. 각 대수층코드는 전술한 바와 같이 8자리의 숫자로 이루어져 있으며 유일하다. Maui섬에서 지하수 산출상태를 대수층 코드로 표시한 예를 들면 다음과 같다. (1)6 : Maui(Island), (2)01 : Wailuku(Aquifer sector), (3)02 : Iao(Aquifer system), (4)121 : Basal, confined, flank(Aquifer Type) 등이다. 따라서 본 역의 대수층 코드는 6-01-02-121가 된다. 각 대수층코드는 대수층과 관련된 다양한 주요 정보들이 담겨 있으며 대수층 코드의 활용도를 높이기 위해 강우량이나 지하수 함양량, 지속적인 산출량이나 부존량과 같은 수리지질학적 인자들과 양(Quantity) 등을 이 코드에 첨가할 수도 있다. 예를 들면 지하수오염과 관련된 사항일 경우에 별도의 정해진 숫자코드를 대수층 코드에 부가하면 된다.

대수층상태 코드(지하수보호) : 미국 EPA의 지하수 분류체계를 이용하여 하와이는 하와이 자체의 수리지질조건에 부합되는 대수층상태 코드를 작성하고 있는데, 본 코드는

대수층으로부터 지하수의 개발정도, 활용도, 염도, 유일성 및 대수층의 오염가능성을 나타낸다. 하와이주 코드는 5개의 숫자로 이루어져 있으며 각각의 숫자는 다섯개의 독립된 항목(category)으로 이루어져 있다. 상술한 5개 항목과 해당 숫자들에 대하여 설명하면 다음과 같다. 즉, 개발상태(대수층에서의 지하수 개발정도)에 따라서는 현재 사용중, 추후 이용가능성이 있음, 가능성이 없음의 3종으로 분류하고, 활용도에 따라서는 음용수(식수), 생태학적 중요도, 중요치 않음(1,2번 해당안됨)으로 역시 3종으로 구분하며, 염도(mg/l, 염소이온농도 기준)는 담수(<250), 저염수(250-1,000), 중염수(1,000-5,000), 고염수(5,000-15,000), 해수등 5종으로 분류한다. 또한 유일성은 대체될 수 없는 대수층, 대체될 수 있는 대수층으로 구분하고 오염가능성(DRASTIC 지수 기준)은 높음(HIGH), 중간(MODERATE), 적음(LOW), 없음(NONE)등 4종으로 구분한다.

대수층상태 코드는 위에서 열거한 각 항목별로 1개씩의 숫자를 부여한다. 예를 들면 현재 지하수를 개발 이용하고 있고(1), 이를 음용수로 이용하고 있으며(1), 염소이온 농도가 250 mg/l이하이고(1), 대체될 수 없는 상황(1)이며, 오염가능성이 높은 지역(1)이라면 하와이주 코드는 11111이 된다. 만약 다른 항목들은 위와 동일하고, 생태학적 중요성은 있으나 음용수로 부적합하며, 염소이온 농도가 750mg/l인 경우에 본 코드는 12211이 된다. 각 항목과 구성 요소들은 하와이 지하수환경 기초 연구에 따라 수정된 미국 환경청(EPA)의 지하수 분류기준에 따른 것이다.

본 대수층상태 코드는 대수층 코드와 쉽게

연계시켜 각 도서의 위치, 수문상태, 지질학적 사항, 이용현황,수질 및 지하수자원의 오염가능성 등을 나타낼 수 있다. 즉, 5개의 숫자를 갖는 대수층상태 코드를 대수층 코드 후미에 연결시켜 결과적으로 13개의 숫자코드가 만들어진다. 예를 들어 코드 60102121(11111)은 Maui섬에 있고, Wailuku sector에 위치하며, Lao system(basal, confined in flank lavas)에 속한 대수층을 의미한다. 끝부분에 괄호로 표시된 5개 숫자는 현재 개발 이용하고 있는 대수층의 지하수가 현재 음용수로 사용되고 있으며 염소이온 농도가 250mg/l 이하이고 대체될 수 없는 수자원이며 오염 취약성이 큼을 의미한다. 이와같은 하와이의 대수층 분류기준과 지하수보호코드는 1994년 6월 부터 시행될 국내 지하수법에 의해 신고된 각 관정의 Well numbering system의 기초자료가 될 수 있을 것이다.

결 론

1. 국내에 부존된 지하수자원은 약 15,000 억 m^3 에 이르며 연간 함양량은 지표수의 평상시 유출량과 동일한 약 228억 m^3 이고, 이중에서 개발이용 가능량은 약 135억 m^3 에 이른다.
2. 그러나 지하수자원은 국내 어느 곳이나 부존되어 있는 것이 아니라 지표수가 하도나 저수지내에만 부존되어 있듯이 지하수자원은 대수층내에만 부존되어 있다. 지하수자원은 비가시적인 즉 지하저수지내에 부존되어 있어 이를 합리적인 이용하기 위해서는 지하저수지인 대수층의 정확한 산출특성이 먼저 명확히 규명되어야 한다.

3. 매년 연례행사처럼 홍역을 치루고 있는 수도물 파동은 결과적으로 국내 지표수 자원의 계절별, 지역별, 부족현상과 오염때문에 일어나고 있다. 따라서 추후 국내 지하수자원의 개발 이용은 필연적이다.
4. 지하수자원의 최적 관리기법(BMP)은 국내 지하수자원을 사전에 잠재오염원으로 부터 오염되는 것을 예방하면서 이를 최적상태로 개발 이용하는 것이다. 즉, 개발 이용하고 있거나 예정인 지하수자원은 그 양과 질이 영구히 변하지 않아야 한다.
5. 따라서 선진외국은 본문에서 언급한 바와 같이 지하수자원이 외부 오염원에 의해 저질화 되지 않도록 강력한 보호 전략을 수행하면서 이를 최적상태로 개발 이용하고 있다.
6. 미국과 스웨덴은 자국내 국토개발 계획과 토지이용의 일환으로 전국에 걸쳐 지하수오염가능성도(일명 대수층오염 취약성도)를 작성하고 있다. 상기 지하수 오염가능성도는 각 지역의 지역특성에 부합되게끔 수정해서 활용하고 있으며, 이 자료는 유해물질 TSDF의 입지선정에 매우 유용하게 이용되고 있을 뿐만 아니라 세계적으로 수자원의 최후보투인 지하수자원의 최적관리기법중 지하수의 보호전략에 널리 이용되고 있다. 따라서 우리도 전국토에 산재된 약 500,000여개 공의 우물자료와 그간 수없이 시굴되어 온 시추자료를 취합하여 지하수오염가능성도를 조속히 작성해야 할 것이다.
7. 국내의 경우, 지하수의 산출특성이 가장 양호한 제주도는 1993년에서 1994년에

- 걸쳐 외국에서 시행하고 있는 광역적인 지하수보호전략(Regional groundwater protection strategy)과 국지적인 지하수 보호전략을 최대한 참고하여 상기 두가지 보호전략을 1차로 수립한 바 있다.
8. 지하수 보호전략은 하와이의 예에서 볼 수 있듯이 단시일에 수립될 수 있는 것이 아니라 상당한 시일과 노력과 수리지질학적의 전문지식을 요하는 분야이다.
9. 따라서 본연구에서 제시된 선진국의 지하수자원 최적관리기법을 최대한 활용하여 1994년 6월 부터 시행될 국내 지하수법의 근간이 될 수 있도록 함과 아울러 풍부하고 고수질인 국내 지하수자원을 우리세대도 최대한 이용하고 후세에게도 깨끗한 지하수자원을 유산으로 물려 줄 수 있는 정책을 펼 수 있도록 해야 한다.

참 고 문 헌

1. 광주지방환경청(1992), 제주도 환경보전 종합대책 - 제4장 지하수자원과 수질.
2. 한정상 외(1971), Groundwater resources of An Yang Cheon Basin, 지질학회지, MOC/AID, 67-94.
3. 한정상(1977), 보조수자원으로서 지하수 자원, 지질학회지, Vol 13, 213-218.
4. 한정상(1977), 금호강유역 지하수자원에 관한 연구, 한국수문학회지, No 4, 9-23.
5. 한정상(1978), 국내 천정의 정호수두손실에 관한 연구, 지질학회지, Vol 14, No 1, 1-4.
6. 한정상(1983), 한반도의 암반지하수에 관한 연구, 한국수문학회지. Vol 19, No 4,

- 73-81.
7. 한정상(1983), 전천유역 석회암대수층에 관한 연구, 한국수문학회지, Vol 16, No 3, 171-179.
 8. 한정상 외(1984), Environmental isotope-aided studies on water resources in the region of Cheju Island, 한국수문학회지, Vol 17, No 2, 72-29.
 9. 한정상 외(1984), A hydrology in korea, Fourth pacific basin nuclear conf., 340-349
 10. 한정상(1988), 금촌 정호장의 최적채수량 및 물수지분석에 관한 연구, 지질학회지, Vol 24, No 2, 140-172.
 11. 한정상(1988), 환경수리지질학, 신우사.
 12. 한정상(1990), 지하수자원 보호의 필요성과 지하수오염, 광산지질학회, 대한지질학회, 24-49.
 13. 한정상, 김천수(1990), 국내 지하수자원의 산출특성과 지하수 수질관리 기술에 관한 연구, International on the 21st century prospects for policies and thecnology for water conservation/국립환경연구소 WHO.
 14. 한정상 외(1991), 울산공업단지 지하수오염 예측을 위한 정량적 수리분산연구, 대한지질학회, Vol 2, No 2.
 15. Bitton, G. et al.(1984), Groundwatwer pollution microbiology, John Wiley & Sonc, 1-375.
 16. Boutwell, S.H. et al.(1986), Modeling remedial action at uncontrolled hazardous waste sites, Noyes pub., 1-431.
 17. BWS/City fand County of Honolulu(1980 a), State of the groundwater resources of southern Oahu, 1-81.
 18. BWS/City and County of Honolulu(1982b), Groundwater/summary report, 1-40.
 19. BWS(1992), Honolulu Board of water supply, annual report.
 20. Canter, L.W. et al.(1986a), Groundwater pollution control, Lewis pub., 1-521.
 21. Canter, L.W. et al.(1988c), Septic tank system effects on groundwater quality, Lewis pub., 1-169.
 22. City and County of Honolulu, organization charts(1993), Board of water supply.
 23. Coffman, T., BWS(1979), Rediscovering water.
 24. Davis, G.H. et al.(1970), Geohydrologic interpretation of volcanic island from environmental isotopes, International Atomin, Energy Agency/WRR. Vol. 1, No. 6, 99-109.
 25. D' Itri, F.M et al.(1988), Rural groundwater contamination, Lewis pub., 115-158.
 26. Fairchild, D.M. et al.(1988), Groundwater quality and agricultular practices, Lewis pub. 127-399.
 27. Hawaii(1994), Dept. of Water County of Kauai, Lihue, Kauai.
 28. Hutchins, W.A.(1990), Water Right Laws in the 19 western states, US/Dept.of Agriculture, Vol. II, chapter Groundwater Right.
 29. Jaffer, M.(1987), Local groundwater protection, APA, 1-256.
 30. Lehr, J.H. et al.(1987), A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings (DRASTIC), NWWA/EPA, 1-83.
 31. Matthes, G.(1982), The properties of grou-

- ndwater, John Wiley & Sons., 164-353.
32. Mink, J.F., et al.(1987), Aquifer identification and classification for Oahu ; Groundwater protection strategy for Hawaii, WRRC/Uni. of Hawaii, 1-11.
 33. Mink, J.F., et al.(1991), Well head protection strategy for Hawaii, Water Resources Research Center/Uni. of Hawaii.
 34. Mink, J.F., et al.(1992), Aquifer identification and classification for Kauai ; Groundwater protection strategy for Hawaii, WRRC/Uni. of Hawaii, 1-21.
 35. NWWA/EPA series(1987), DRASTIC.
 36. ORIR 88-01/US/EPA(1992), GIS guidelines document, 1-1, 5-9.
 37. Romijn(1986), Impact of agricultural activities on groundwater, IAH., Vol.5, 28-129.
 38. State of Hawaii, Hawaii administrative rules, chapter 183, 184, 185, 174c, amendment to chapter 13-169.
 39. State of Hawaii(1992), Maui County water use and development, Commission of Water resources management/Dept. of land and natural resources.
 40. US/EPA/625/6-85/006(1985), Handbook ; remedial action at waste disposal sites (Revised), 1-1, 11-32.
 41. US/EPA(1987), Guideline for delineation of well head protection area.
 42. Office of Technology Assessment, U.S. Congress, 1984, "Protecting the Nations Groundwater Contamination" OTA-0-233
-

한정상

한서엔지니어링

서울시 강남구 역삼동 773-4

TEL : (02) 553-8681

FAX : (02) 554-3831