

비음용 지하수 오염물질 기준설정체계 구축 연구: (2) 일반오염물질

안윤주^{1*} · 남선화¹ · 정승우²

¹건국대학교 보건환경과학과

²군산대학교 환경공학과

Establishment of Non-drinking Groundwater Quality Standards: General Contamination Substances

Youn-Joo An^{1*} · Sun-Hwa Nam¹ · Seung-Woo Jeong²

¹Department of Environmental Health Science, Konkuk University

²Department of Environmental Engineering, Kunsan University

ABSTRACT

To date, there was no systematic basis for establishing the content and allowed levels of general contamination substances in the Korean groundwater quality standards for non-drinking water. Recently, use of specific procedures for deriving valid groundwater quality standards have become mandatory. This study first investigated the methodology for deriving groundwater quality standards in the European Commission (EC), considering background groundwater quality and domestic and international standards related to water quality. Furthermore, this study investigated the existing specified procedure of standards related to water quality (e.g. surface water, drinking water, and wastewater). Our findings showed that EC and Member States presented the methods for deriving groundwater threshold values for general chemicals. Finally, we have proposed the following procedures of deriving Korean groundwater quality: (1) Selection of groundwater pollutant population, (2) selection and monitoring of priority substances, (3) monitoring, (4) selection of groundwater quality standard candidates, (5) selection of new substances and values for groundwater quality standards.

Keywords : General contamination substances, Groundwater, Water quality standards

1. 서 론

지하수는 빗물 침투와 같은 물의 순환 과정을 통해 지속적인 보충이 가능한 수자원이나, 수요 증가로 고갈되거나 대수층의 오염으로 훼손될 경우 지표수, 먹는 물, 토양 매체보다 복원이 용이하지 않다. 국내 지하수는 2012년 기준 연간 39.89억 톤이 이용되고 있으며 이는 수자원 총량 중 3%를 차지한다. 용도별로는 농업용수 50.1%, 생활용수 44.7%, 공업용수 4.4%, 기타용수 0.8%의 비율로 이용되고 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Water Resources Corporation, 2013).

지하수의 오염 방지를 위해 지속적인 수질 관리가 필요하며, 국내에서는 “지하수의 수질보전 등에 관한 규칙(환

경부령 제 476호, 2012.09.24.)”에 의거하여 지하수 이용 목적별로 일반 오염물질 항목 4개(pH, 총대장균군, 질산성질소, 염소이온)과 특정 유해물질 15개 항목(카드뮴, 비소, 시안, 수은, 유기인, 페놀, 납, 6가크롬, 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌, 1,1,1-트리클로로에탄, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌)에 대하여 제도적으로 관리하고 있다. “지하수의 수질보전 등에 관한 규칙”은 1994년 제정된 이래로, 2003년 1차 그리고 2010년 2차 개정되었다. 일반 오염물질 항목은 1994년 5개(pH, COD, 대장균군수, 질산성질소, 염소이온), 2003년 5개(pH, 대장균군수, 질산성질소, 염소이온, 일반세균), 그리고 2010년 4개(pH, 총대장균군, 질산성질소, 염소이온)로 변경되었다. 이 2차례의 개정 과정에서 COD, 대장균군수, 일반세균은 삭제되

*Corresponding author : anyjoo@konkuk.ac.kr

Received : 2014. 6. 27 Reviewed : 2014. 10. 13 Accepted : 2014. 10. 13

Discussion until : 2015. 2. 28

있으며 총대장균군이 추가되었다. 그러나 이러한 일반 오염물질 항목의 지하수 수질기준은 항목 및 기준치 설정 근거가 명확하게 제시된 바 없으며, 일부 제정 또는 개정 과정에 대해 기존 지하수 관련 보고서를 통해 일부 유추할 수 있다(Nam et al., 2013). Council for Environmental Science(1993)에서 음용수 수질기준, 수질환경기준, 특정수질유해물질을 바탕으로 최종적으로 지하수 우선관리항목 26종을 제시한 바 있으며, 이 중 pH, 질산성질소, 염소이온이 포함되어 있다. 또한 Ministry of Environment(ME)(1999)에서 COD는 지하수 모니터링 시 미량 검출되며 지하수 자정능으로 무의미한 항목이므로, 과도한 기준 설정을 방지하기 위해 기준 삭제의 필요성을 언급한 바 있다. 그리고 ME(2007)에서 인체 위해성이 낮고, 다른 미생물 항목으로 충당되므로 일반 세균 항목에 대한 기준 삭제의 필요성을 언급한 바 있다. 그러나 pH, 질산성질소, 염소이온과 같은 초기 항목의 설정 근거와 제정 및 개정 과정 시 기준치 설정 근거에 대한 명문화된 자료 부재로 유추가 불가하였다.

따라서 지하수 일반 오염물질 항목에 대한 신규 항목 추가 또는 기존 항목 개정 시 적용 가능한 기준설정체계를 마련할 필요가 있었다. 특히 일반 오염물질 항목은 특정유해항목과 달리 위해성이 고려되지 않으므로, 배경농도를 중심으로 체계적인 방법론을 제시하고 있는 유럽 지역의 지하수 문턱값 산출 방법을 중점적으로 분석하고, 또한 국내 실정을 반영하기 위해 국내 타 수질 관련 기준 설정체계에 대해 분석하는 연구가 필요하였다. 이러한 기반 연구를 바탕으로 저지는 향후 국내 적용 가능한 일반 오염물질 항목에 대한 지하수 기준설정체계를 제안하고자 하였다. 또한 본 연구는 환경부 국립환경과학원의 “신규 지하수 오염물질 기준설정체계 확립 연구”(National Institute of Environmental Research, 2012)의 일환으로, 비음용 목적의 지하수 일반 오염물질 항목에 대한 수질기준 설정체계 구축 시 반영하도록 하였다.

2. 유럽 지역의 지하수 문턱값 산출 방법 연구

유럽 지역은 유럽위원회에서 제시한 European Water Framework Directive(2000/60/EC)(European Commission, 2000)와 European Groundwater Directive(2006/118/EC)(European Commission, 2006a)를 바탕으로 지하수의 화학적 상태를 평가할 수 있는 기준 2개와 문턱값(Threshold value, TV) 10개를 제안하고 있다. 이때 기준 항목은 질산염 50 mg/L, 살충제 0.1 µg/L(개별 물질)과

0.5 µg/L(전체 물질)을 포함하고 있으며, 문턱값 항목은 자연/인위적 활동의 대표성 물질(As, Cd, Pb, Hg, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄²⁻), 인공합성물질(TCE, PCE), 염 또는 기타 해수침투 영향(전기전도도)을 포함한다. 문턱값은 유럽 회원국에서 고려해야할 최소한의 물질 목록만 제시하였고, 유럽 회원국은 지역 특성, 모니터링 자료, 과학적 정보 등 자국의 상황을 고려하여 문턱값 수치를 제시하였다. 유럽 위원회에서 제시한 최소한의 물질 목록 중 포르투갈과 같이 위해성 미약이라는 정당한 사유가 존재할 경우에는 문턱값을 제시하지 않을 수 있다.

각국별 문턱값은 지하수 용도 및 수용체별 준거치(Criteria value, CV)와 배경농도(Background level, BL) 간 상관관계를 고려하여 산출된다(European Commission, 2009, 2010). 지하수 용도 및 수용체별 준거치는 수생태 및 지하수에 의존하는 육상생태계 보호 시 적용되는 환경 준거치와 식수원 보호구역에서 음용수 보호 및 기타 지하수의 합법적 사용 시 적용되는 사용 준거치로 분류된다. 이 때 환경 준거치는 지하수와 지표수의 연결성(예. 물의 순환, 지표수 관련 생태계의 지하수로부터의 먹이 공급)을 고려하기 위해 지표수에 대한 환경질기준(Environmental quality standards, EQS)을 활용하며, 대수층과 하천 사이의 상관관계를 고려하기 위해 희석계수(Dilution factor, DF) 및 저감계수(Attenuation factor, AF)를 활용한다. 따라서 환경 준거치에 대한 수식은 $CV = EQS \times AF/DF$ 이나, 희석계수 및 저감계수에 대한 가용한 자료가 미비할 경우 이를 배제할 수 있다. 또한 사용 준거치는 음용수 보호 목적 시 EC, WHO 및 각국의 먹는물 기준을 순서대로 고려하며, 농업용수나 공업용수와 같은 기타 용도 보호 목적 시 관련 용도의 기준을 고려한다.

한편, 각국별 배경농도는 지하수 모니터링 자료를 활용하여 산출하며, 체코 공화국은 지하수 모니터링 자료의 95%, 스페인은 지하수 모니터링 자료의 50%, 90%, 97.7%, 핀란드는 지하수 모니터링 자료의 90%, 루마니아는 지하수 모니터링 자료의 50%, 90%, 슬로바키아 공화국은 0을 적용한 바 있다. 이 외에도 특정 범위의 대표값을 명확히 제시하지는 않았으나, 영국은 Baseline 및 Background criteria for the identification of groundwater thresholds(BRIDGE) 방법론에 따라, 벨기에는 BRIDGE 방법론에 따라 배경농도를 산출한다고 언급한 바 있다. Baseline은 1999~2004년 5년 간 영국의 지질조사소와 환경부에 의해 영국의 대수층 유형별로 배경농도를 평가한 사업으로, 약 80여개 물질에 대한 362~2301개 모니터링 자료를 바탕으로 최소값, 최대값, 중앙값, 평균값, 97.7번

Table 1. Methodology presented by Member States of European Commission (EC) according to correlation of background levels (BL) and criteria value (CV)

Methodology	Member states of European Commission (EC)	Reference
Case I (BL < CV) TV = BL TV = between BL and CV or $0.5 \times (CV + BL)$ TV = between BL and CV TV = CV	Bulgaria, Czech Republic (for metals), Latvia (for ammonium and BTEX) and Romania Belgium (Flanders) and Slovak Republic Spain, Malta (TV = percentage of CV) Germany, Denmark and the Netherlands	
Case II (BL > CV) TV = BL TV = BL + small addition TV = BL + small addition of 10% TV = BL + small addition of 20% TV = 2BL	Belgium (Flanders), Cyprus (for sulfates, chloride and conductivity), Czech Republic, Germany, Denmark, Spain, Ireland, Italy, Malta, Slovak Republic The Netherlands Bulgaria Romania Finland	EC, 2010

제 백분위수를 제시한 바 있다(Environment Agency, 2007). 또한 BRIDGE는 2005~2006년 1년 간 유럽집행위원회에 의해 서유럽의 지질학적 특성별로 배경농도를 평가한 사업으로, 자연적으로 발생하는 물질에 대한 모니터링 자료를 바탕으로 90%, 97.7% 통계값을 제시한 바 있으며, 인위적 오염을 배제하기 위해 질산성질소 10 mg/L, 염소이온 200 mg/L 이상인 자료는 제외한다(European Commission, 2006b; Radu et al., 2010). 마지막으로 앞서 산출된 지하수 용도 및 수용체별 준거치와 자국별 배경농도 간 상관관계는 배경농도가 준거치보다 낮을 경우 위해성 및 기능을 고려하여 배경농도와 준거치 사이 수치 (BL < TV < CV)로 문턱값이 설정되는 Case 1과 배경농도가 준거치보다 높을 경우 배경농도와 유사한 수준으로 문턱값이 설정되는 Case 2로 분류된다(European Commission, 2009, 2010). 특히 Case 2는 Table 1과 같이 유럽 회원국마다 차별적으로 적용하며, 키프로스 공화국 등은 배경농도를, 네덜란드, 불가리아, 루마니아는 배경농도보다 10~20% 높은 수치를, 핀란드는 배경농도의 2배를 적용한 바 있다(European Commission, 2010).

3. 국내 타 수질 관련 기준설정체계 연구

국내 타 수질 관련 기준은 수질환경기준, 먹는물기준, 배출허용기준이 있으며, 명문화된 자료를 통해 기준설정 체계를 제시하고 있다. 먼저 National Institute of Environmental Research(2012)에 의하면, 수질환경기준 설정체계는 7단계로 분류되며, 수질유해화학물질 모집단 선정, 위해성평가 가능, 모니터링 대상항목 선정, 모니터링 수행,

위해성 평가, 우선검토대상항목 선정, 수질환경기준 신규 항목 선정 및 항목별 기준치 설정 과정을 거친다. 우선 신규 항목 설정 시 후보물질 범위를 선정하기 위해 수질 유해화학물질 모집단은 국내의 수질관련환경기준 항목, 국내 배출량 조사 대상 물질, 국내 수질 모니터링 자료 존재 물질을 바탕으로 선정된다. 또한 위해성 평가 가능 여부를 판단하기 위해 위해성 평가의 수질 준거치 산출 시 가능한 발암계수, 비발암참고치, 생물농축계수와 같은 수식 인자의 유무를 확인한다. 그리고 물질의 우선순위를 선정하기 위해 물질별 노출, 독성, 관심인자, 자료신뢰를 고려한 화학물질 우선순위 체계 CRS-CRAFT를 활용하며, 동시 분석 가능성, 분석 비용 등의 분석 용이성을 기초로 모니터링 대상항목을 선정한다. 또한 대상항목별 모니터링 자료는 중권역 114개 지점을 대상으로 연간 3회, 3년 연속 측정된 자료를 활용한다. 위해성 평가는 발암·비발암 영향 수치를 활용한 준거치와 모니터링 대표값을 비교한 ECR(Exposure-Criteria Ratio)을 기반으로 수행된다. 그리고 우선검토대상항목 선정은 위해성 평가 시 산출된 ECR, 모니터링 자료의 누적 검출률, 사회적 관심도를 바탕으로 수행된다. 선정된 우선검토대상항목 중 공학적·분석적·경제적 타당성 분석 및 국내의 수질관련환경기준과의 비교를 바탕으로 항목별 수질환경기준치를 설정하며, 최종적으로 수질환경기준 신규항목을 선정한다.

National Institute of Environmental Research(2008b)에 의하면, 먹는물기준 설정체계는 6단계로 분류되며, 모니터링항목 선정, 후보물질 선정, 먹는물 감시항목 선정, 신규 먹는물 기준항목 선정, 신규항목의 준거치 산정, 신규항목의 먹는물기준 설정 과정을 거친다. 모니터링 항목

선정은 정수장에서 검출 가능한 물질, 국내 미규제 먹는 물기준 항목, WHO 먹는물기준, 선진국의 먹는물기준 또는 권고치 등을 바탕으로 수행된다. 또한 후보물질 선정은 정수장에서 한번이라도 검출된 사례가 있는 물질, 검출된 사례가 없는 물질이라도 수계배출량이 크고, 국내 유통량이 많은 물질을 바탕으로 수행된다. 그리고 먹는물 감시항목은 물질의 노출개연성(예. 배출량, 유통량, 잔류성, 생물축적성 등)과 인체 유해성(예. 급성독성, (아)만성독성, 발암성, 기타 독성)을 바탕으로 지속적인 검출가능성이 있고 인체위해 우려가 있는 물질을 선정한다. 또한 신규 먹는물기준 항목 선정은 위해성 평가치 및 사회적 관심도를 바탕으로 수행된다. 그리고 신규항목의 준거치 산정은 WHO의 방법론을 활용하여 일일허용섭취량, 체중, 일일물 섭취량 등을 고려한다. 마지막으로 신규항목의 먹는물기준 설정은 준거치에 대한 공학적, 분석적, 경제적 타당성 분석을 통해 수행된다.

National Institute of Environmental Research(2008a)에 의하면, 배출허용기준 설정체계는 5단계로 분류되며, 수질오염물질의 수환경으로 배출 여부, 수질오염물질에 대한 수질환경기준의 존재 여부, 수질 근거 배출허용기준, 기술적/경제적 타당성 분석, 배출허용기준 설정 과정을 거친다. 수질오염물질의 수환경으로 배출 단계는 산업폐수 종말처리장 및 개별 배출업소에서 배출 여부를 확인한 후, 점오염원으로부터의 배출이 확인되지 않을 경우 비점오염원 등의 오염원에 대한 전면적인 조사를 통해 배출 여부를 확인한다. 다음으로 수질오염물질에 대한 수질환경기준이 존재할 경우 이를 활용하며, 수질환경기준이 존재하지 않을 경우 인체 및 생태 유해도, 외국 기준치, 검출한계 등을 바탕으로 잠정 기준을 설정한다. 그리고 잠정 기준(안) 설정 단계 중 가나/특례지역에 대한 배출허용기준(안)은 수질 근거 배출허용기준과 기술 근거 배출허용기준을 비교한 후, 기술적/경제적 타당성 분석을 통해 수행되며, 청정지역에 대한 배출허용기준(안)은 가나/특례지역에 대한 배출허용기준 × 10로 설정된다.

4. 일반 오염물질 항목에 대한 한국 지하수 수질기준 설정체계 제안

유럽지역의 배경농도 기반 일반 오염물질 항목의 지하수기준 설정 근거와 국내 타 수질 관련 기준설정체계를 바탕으로 일반 오염물질 항목의 한국 지하수기준 설정체계를 다음과 같이 제안하고자 한다.

한국 지하수기준 항목 및 기준치 설정체계는 지하수오

염물질 모집단 선정, 모니터링 우선항목 선정, 모니터링 수행, 지하수 수질기준 후보물질 선정, 일반물질 지하수 수질기준 신규항목 선정 및 항목별 기준치 설정 단계로 구성하였다.

먼저 지하수오염물질 모집단을 선정하기 위해서는 국외 지하수기준 공통 항목, 국내 50만 톤 이상의 물질 유통량 자료를 활용하도록 한다. 이때, 복합체 및 Non-Cas No. 물질은 제외한다. 다음으로 모니터링 우선항목 선정은 노출 가능성, 인체 및 수서독성, 관심인자, 매체연계, 자료 신뢰도 평가 인자를 적용한 지하수오염물질 우선순위선정 프로그램인 CRS-CROWN(National Institute of Environmental Research, 2009)을 활용하여 물질의 우선순위를 선정한 후, 분석 용이성에 따라 물질군을 형성한다. 그리고 모니터링 시 지점, 빈도, 심도 등을 고려하며, 지하수 수질기준 후보물질은 누적검출률(2회/연, 3년), 사회적 관심도를 고려하여 선정한다. CRS-CROWN은 현재 환경부에서 지하수 모니터링 후보물질 선정에 활용되고 있다.

일반 오염물질 항목은 유럽지역의 문턱값 산출 방법에 따라 배경농도와 지하수, 먹는물, 지표수, 배출수와 같은 국내외 수질관련기준과 비교하여 일반 오염물질 항목의 농도를 산출하고, 배경농도, 공학적/분석적 영향, 국내외 수질관련기준을 고려하여 가장 완화된 수치를 항목별 기준치로 설정한다(Fig. 1). 이 때 배경농도는 보수적인 위해성평가를 위한 최적최대노출(Reasonable maximum exposure, RME)을 고려하여 지하수 모니터링 자료의 95% 상한치를 활용하며(USEPA, 1989), 인위적 오염원을 배제하기 위해 질산성질소 10 mg/L, 염소이온 200 mg/L 이상인 자료는 제외한다(European Commission, 2006b; Radu et al., 2010). 공학적/분석적 영향 중 공학적 영향은 현재의 공학적 처리 능력에 의해 수계 배출 후 희석 농도로 간주할 수 있으므로 모니터링 자료의 최소값을 활용하고, 분석적 영향은 미국 NEMI(National Environmental Methods Index)의 분석기기별 정량한계 목록의 최소 정량한계를 활용한다.

국내외 수질관련기준은 국내 먹는물 기준, WHO 먹는물 기준, 국외 먹는물 기준 중 강화 기준, 국내 지표수 기준, 국외 지표수 기준 중 강화 기준, 국내 배출수 기준, 국외 배출수 기준 중 강화 기준, 국외 지하수 기준 순으로 적용한다. 이 때 기준치(안)은 지하수 용도 및 수용체별 준거치와 자국별 배경농도 간 상관관계(European Commission, 2009, 2010)를 보완하여 배경농도가 국내외 수질관련기준보다 낮을 경우 경우에 따라 배경농도, 0.5 × (배경농도 + 수질관련기준), 배경농도-수질관련기준, 수질

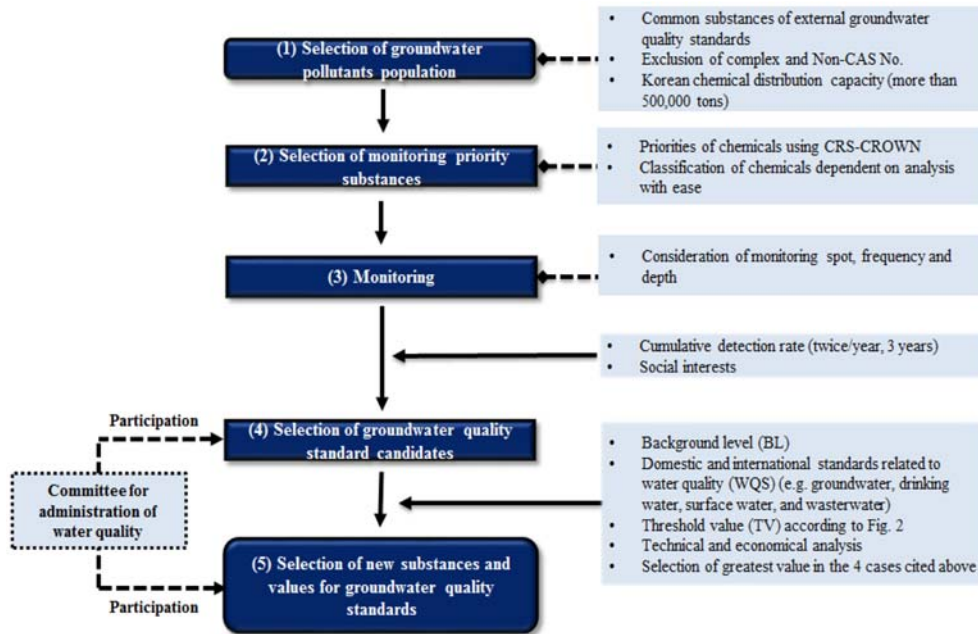


Fig. 1. System of establishing groundwater quality standards for general contamination substances in Korea.

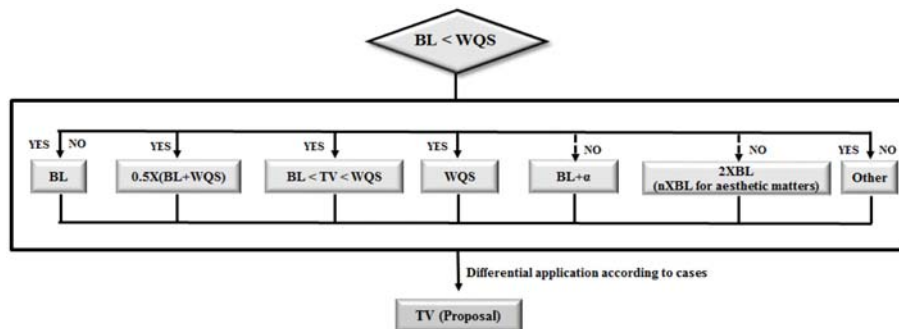


Fig. 2. System of establishing groundwater threshold value for general contamination substances in Korea. BL: Background level, WQS: Domestic and international standards related to water quality, TV: Threshold value.

관련기준 등을 적용하며, 배경농도가 수질관련기준보다 높을 경우 경우에 따라 배경농도, 배경농도 + α , 2 × 배경농도(단, 심미적 물질의 경우 n × 배경농도) 등을 적용한다 (Fig. 2).

5. 현재의 제한점 및 향후 방향 제시

본 연구에서 제안된 일반 오염물질 항목의 한국 지하수 기준 설정체계는 배경농도 산출 시 모니터링 지점, 빈도, 심도 등을 고려할 수 있도록 체계적인 모니터링 자료 구축이 선행되어야 한다. 특히 모니터링 자료는 일반물질의 노출수준을 평가할 수 있는 가장 객관적인 자료로서 신뢰성 높은 자료 확보가 필요하며, 이를 위해서는 대표적인

모니터링 지점 선정, 모니터링 다회 수행, 지하수 심도 구분 등을 고려한 모니터링 체계를 마련할 필요가 있다. 더불어 석회암 지대의 지하수는 칼슘 이온 농도가 높고, 화강암 지대의 지하수는 규소 이온 농도가 높은 것과 같이, 지하수는 지질학적 특성에 따라 수질 특성이 상이하다. 따라서 유럽 지역에서 유럽 회원국과 협력하여 지질학적 특성에 따라 구획을 설정하고 배경농도를 산출하는 바와 같이, 한국의 지질학적 특성 조사 및 그에 따른 지하수 수질특성 변화도 점진적으로 고려할 필요가 있다.

References

Council for Environmental Science (CES), 1993, A Study on

- Establishment of Groundwater Quality Standards and Groundwater Pollution Judgement Standards.
- Environment Agency (EA), 2007, The natural (baseline) quality of groundwater in England and Wales.
- European Commission (EC), 2000, Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the community action in the field of water policy.
- European Commission (EC), 2006a, Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioration.
- European Commission (EC), 2006b, Scientific support to policy BRIDGE background criteria for the identification of groundwater thresholds.
- European Commission (EC), 2009, Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC) Guidance document No. 18 Guidance on groundwater status and trend assessment.
- European Commission (EC), 2010, Commission staff working document accompanying the report from the commission in accordance with article 3.7 of the groundwater directive 2006/118/EC on the establishment of groundwater threshold values.
- Ministry of Environment (ME), 1999, A Study on Examination of Adequacy and Control Scheme for Groundwater Quality Standards.
- Ministry of Environment (ME), 2007, A Study on Preceding Scheme for Improvement of Groundwater Quality Standards.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Water Resources Corporation, 2013, Groundwater Annual Report.
- Nam, S.-H., Lee, W.-M., Jeong, S.-W., Kim, H.-J., Kim, H.-K., Kim, T.-S., and An, Y.-J., 2013, Comparative Study of Groundwater Threshold Values in European Commission and Member States for Improving Management of Groundwater Quality in Korea, *J. Soil Groundw. Environ.*, **18**(3), 23-32.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2008a, A Study on Establishment for Expanding Specific Water Quality Substances and Effluent Standards (VIII).
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2008b, A Study on Establishment System for Standards of Drinking Water.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2009, A Study on Chemical Ranking and Scoring Methodology for Groundwater Pollutants.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2012, A Study on Establishment System for Standards of New Groundwater Pollutants.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2012, A Study on Expansion of Environmental Quality Standards to Protect Aquatic Ecosystem.
- Radu, E., Balaet, R., Vliegthart, F., and Schipper, P., 2010, Derivation of threshold values for groundwater in Romania, in order to distinguish point & diffuse pollution from natural background levels, *Environ. Eng. Res.*, **15**(2), 85-91.
- USEPA, 1989. Risk assessment guidance for superfund. Volume I: Human health evaluation manual (Part A).