[기술보고]

지하수오염방지 시설기준의 개선에 관한 연구:
지하수오염관정에의 팩커그라우팅 적용사례

추창오¹ · 류종흠¹ · 조희남² · 정교철^{1*}

¹안동대학교 지구환경과학과, ²(주)지앤지테크놀로지

[Technical Report]

A Study on Improving Installation Guideline of Facilities
to Protect Groundwater Contamination: Applications
of Packer Grouting to Contaminated Wells

Chang-Oh Choo¹, Jong-Heum Ryu¹, Heuy Nam Cho², and Gyo-Cheol Jeong^{1*}

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

²G&G Technology Co., Ltd.

국내 현행 지하수법에서는 오염방지 시설에 관한 개략적인 설치규정만이 설정되어 있어서 대수층의 특성을 고려하지 않은 일률적인 오염방지 시설 기준이므로 지질에 따라 다양하게 발달하는 우리나라의 지하수자원을 효과적으로 보호해 주지 못한다. 최근에는 지하수오염방지에 중요한 기술과 장치로서 팩커개발이 점차 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 경북 안동시 서후면, 충남 연기군의 오염된 지하수공에 대하여 하부지하수오염방지시설로서 팩커의 적합성을 검토한 결과, 그 효과는 우수한 것으로 나타났다. 연구대상지인 경북 안동시 서후면 창풍리의 경우 팩커를 시공한 결과 탁도는 94%, 연기군 남면 놀왕리의 경우 질산성 질소는 60% 감소효과를 나타내었으며, 이로 인해 모든 수질검사항목에서 적합수질을 보였다. 지하수오염방지를 위해서는 정확한 관정카메라 촬영과 오염원 모니터링 분석을 실시하고, 이에 근거하여 지질특성, 풍화대심도, 파쇄대 발달, 대수층의 수리경사, 오염물의 이동경로를 파악한 후, 통합적으로 지하수오염 가능성을 평가하고, 이를 통하여 적절한 그라우팅과 케이싱 작업이 이루어져야 한다. 유용한 대수층 구간을 확보하여 오염물을 차단하는 그라우팅, 팩커장치, 케이싱은 지하수의 활용과 오염방지에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

주요어 : 지하수법, 팩커, 지하수 오염방지, 대수층, 케이싱

Because the present groundwater law broadly regulates a simple and impractical guideline ignoring aquifer characters and geology, general purpose facilities for protection of groundwater contamination is still considered unsatisfactory to ensure groundwater resources. In recent, there have been growing attempts in the packer development as crucial techniques and devices for groundwater protection. This study investigated the application of packer grouting techniques to contaminated groundwaters of two well sites in the Andong and Yeongi areas, both of which revealed a satisfactory effect with improved water quality: 94% decrease in turbidity at the Andong area and 60% decrease in NO₃-N, respectively. Based on aquifer characters including geology, weathering depth, fracture pattern, hydraulic gradient, and the flow path of contaminants, the integrated properties of groundwater contamination should be evaluated and treated with the help of accurate analyses such as bore hole imaging and monitoring data. Packer grouting and casing on well to ensure the useful aquifer free of contaminant are expected to play important role in inhibiting the inflow of contaminants when adequately applied. Therefore it is concluded that these can serve as reliable tools in remediation and protection of contaminated groundwater as well as efficient utilization of groundwater.

Key words : groundwater law, packer, protection of groundwater contamination, aquifer, casing

*Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 언

지하수 관정은 개발당시부터 철저한 조사가 필수적인데, 개발 이후에 적절한 관리가 부족할 경우 수량감소나 수질악화로 인하여 제 기능을 발휘하지 못하게 되므로, 관정의 효율저하는 결국 폐공으로 이어져 다시 관정을 개발해야 하는 등 경제적 손실을 발생시킨다. 보다 근본적인 지하수 오염의 문제점은 육안으로 관찰할 수 없는 부분인 지하수공 하부와 케이싱으로부터 다양한 오염원이 유입될 수 있다는 것이다. 즉 지하수 오염원이 지표로부터 직접 지하수공으로 유입되는 것이 아니라, 지하수공 분포지의 지표오염원으로부터 대수층으로 유입되는 일련의 지하수 함양과정과 밀접히 관련된다는 것이다.

최근 국가지하수정보센터(GIMS)의 데이터베이스에 따르면 2010년도 기준 전국의 지하수 관정은 1,380,715 개이고, 허가시설의 개수는 24,555공에 이른다. 용도로는 생활용수가 가장 높고, 그 다음으로는 농업용수가 차지하는데, 생활용수의 경우 가정용이 주를 차지하며, 농업용수의 경우 답작용이 대부분을 차지한다. 국내에서 각종 내외인적 요인에 의해 지하수가 오염되어 일부 관정은 방치되거나, 폐공되는 상황이 빈번하여 경제적 손실이 막대하다. 2008년 GIMS 지하수조사년보에 의하면 69,339공의 방치폐공의 20.6%인 14,305공이 수량부족으로 방치되어 폐공 처리되고 있으며, 수질악화 및 사용증가에 의해 폐공된 공의 수는 48.5%인 33,688공에 달한다(Fig. 1). 최근 국내에서 발생하는 불용공은 2009년 12월 기준으로 4,152개이고, 이중에서 3,865개가 처리되었으며, 2008년 말까지 발생한 불용공은 77,247개로서, 이 중 약 12,377개의 공은 제대로 처리되지 못한 방치공에 해당한다(GIMS, 2009, 2010, 2011). 현재 사용하지 않고 방치되어 있는 폐공은 처리공, 처리예정공, 매몰공, 방치공 등으로 세분된다. 이 중 가장 문제가 되는 것은 방치공으로서, 이는 개발 과정에서 또는 사용 중 지하수의 수량이 부족하거나, 수질이 악화되거나, 상수도의 설치 및 용도변경 등에 의하여 지하수 우물을 폐공처리하게 된다. 2009년 말 기준 폐공처리 공법의 경우 케이싱 제거 및 시멘트슬러리 몰탈 되메움법(56.6%)을 비롯하여 케이싱 미제거 및 시멘트슬러리 몰탈 되메움법(24.7%), 일반토사 되메움법(5.9%) 등으로 처리되고 있는 실정이다(GIMS, 2010). 이러한 실정은 여전히 우리나라의 지하수 오염방지 정책은 문제가 발생한 후에 대처하는 후속개념이 강함을 보여준다.

Fig. 1. The proportions of abandoned wells (calculated from 2010 GIMS statistical data).

이제는 오염된 지하수를 폐공처리하기보다는 애초부터 제대로 된 오염방지시설을 갖춘 지하수공을 시공함으로써, 지하수로 유입될 수 있는 지표오염원의 예방, 제거 및 체계적인 관리와 더불어서 지하수공 자체도 예방개념으로 전환해야 할 시점에 와 있다. 이는 이미 현실적으로 우리나라가 지하수를 무한대로 개발할 수 없는 상황에 처해 있고, 기존에 착정된 수많은 지하수공을 제대로 정화, 재활용함으로써 효과적이고 경제적인 지하수보전과 관리정책을 수립해야 할 당위성이 있기 때문이다.

지하수법상 지하수공에는 오염물질 방지시설 설치규정이 있으나, 먹는 샘물을 비롯한 일부 대규모 음용수 지하수공을 제외하면 현실적으로 지하수오염방지 시설이 잘 구비되어 있지 않다. 특히 소규모 관정, 농업용 관정, 지하수법 시행 이전에 개발된 과거의 공은 지하수 오염방지 시설이 거의 되어 있지 않거나, 개발 이후부터는 전혀 점검받은 적이 없어 상당히 불량하다. 지하수 사후관리의 중요성에 대해 범국민 및 해당기관의 인식은 과거에 비하여 향상되었으나, 선진국에 비하면 여전히 부족한 실정이다. 따라서 정기적인 점검과 관리가 어려운 만큼 처음부터 효율적인 오염방지 시설을 사용하여 후속관리의 어려움을 미리 예방할 필요가 있다. 이를 위하여 경제성이 있는 오염방지시설을 개발하여 사용함으로써 체계적인 지하수 보존과 관리가 필요하다.

최근 팩커를 이용한 지하수 오염방지 기술과 관련된 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 지하수 심정의 상층 오염지하수 유입방지를 위한 지표하부 보호벽을 형성함에 있어 차수용 재료를 케이싱 하단부에서부터 채워올릴 때 차수용 재료의 누출이 발생되지 않도록 그라우

팅 케이싱 하부를 차폐할 수 있는 대표적인 것이 팩커 장치이다. Cho et al. (2003, 2009) 및 Cho and Choi (2010)는 팩커그라우팅 공법을 이용하여 지표하부 오염 방지시설 개선법을 제시하였으며, Seong et al. (2000, 2003)는 도시지역의 오염지하수 수질 개선연구의 일환으로 팩커에 의한 오염구간 차단연구를 수행한 바 있다. 그 외에 Lee et al. (2002, 2010)는 질산성질소 및 탁도로 오염된 지하수공에 대해 팩커를 적용하여 수질개선을 연구하였다.

본 연구에서는 경북 안동시 서후면, 충남 연기군의 오염된 지하수공을 대상으로 오염원의 유입구간을 분석한 후, 팩커를 적용하여 오염물을 적절히 차단하고, 하부지하수오염 방지시설로서 팩커의 적합성을 검토하였다.

연구방법

본 연구에서는 현재 오염되어 있는 지하수관정에서 상층부 오염지하수 유입방지를 위해서 지표하부보호벽 그라우팅 구성을 위한 압축팩커장치 기술(신기술인증서 제 275호)을 적용하였다. 이는 지표하부보호벽 형성을 위한 그라우팅 과정에서 그라우팅 제재의 누출이 발생되지 않도록 그라우팅 케이싱 하부에 결합할 수 있도록 구성된 그라우팅 압축팩커장치와 이를 이용한 지표하부보호벽 그라우팅방법에 관해 규정한 기술이다. 즉 그라우팅 케이싱 하단에 설치한 외관과 내관의 안전장치 해체를 통해 상호 슬라이딩하여 팩커용 고무를 압축하게 함으로써, 그라우팅 케이싱과 지하수 심정 공벽 사이를 차폐시킬 수 있도록 구성된 그라우팅용 압축팩커장치를 적용한다(Fig. 2).

본 연구에서는 시험지역인 안동시와 연기군 지역 지하수공에서 오염구간을 확인하고, 지하수오염방지 효과가 최대한 나타날 수 있도록 물리검층을 실시하여 지하수 관정내부의 착정상태 및 굴착심도 확인, 지표하부 차수벽시공의 적합성과 심도확인, 오염지표수 유입여부확인, 관정내부의 수리지질상태, 암반절리층 및 파쇄대 유무 및 부위를 관찰하고 판독하였다. 이를 위하여 먼저 공내촬영을 실시하고, 지하수오염방지시설을 설치하기 위해서는 먼저 내부자재를 공 밖으로 빼내는 인발작업을 하고, 공내 각종 오염물과 클로킹 물질 등을 브러쉬로 에어썬을 실시한 후, 예비팩커를 설치하였다. 그런 다음에 상기 팩커그라우팅 유니트를 설치하고, 공 주변에 그라우트 차수벽을 실시하였다. 그라우팅은 그라우팅 재료의 분리작용을 방지하고 외부물질의 유입을 방지할

Fig. 2. Photos of compression packer (left) and expansion packer (right).

수 있도록 그라우팅 펌프를 사용하여 반드시 하부에서부터 충전 함으로써 공극 현상이 발생되지 않는 견실한 그라우팅이 이루어지도록 하였다. 즉 그라우팅 주입재는 하부에서부터 채워지도록 그라우팅 펌프와 호스를 구비하여 작업하며, 그라우팅 주입재가 누설이 없음을 확인하면서 주입재가 지표로 차 올라와 넘칠 때 까지 작업을 계속하였다. 대표적인 오염성분인 질산성질소를 시공 전, 후로 구분하여 분석하여 비교함으로써 팩커의 차단효과를 검증하였다.

지하수오염방지 지표하부 보호벽

지하수오염방지 압축팩커

지표하부보호벽 구성을 위한 압축팩커장치기술은 그라우팅 케이싱과 동일한 내부직경을 확보하여 내부우물 자재 및 관정 수증펌프등 지하수 관정 내부시설물의 설치에 장애가 발생되지 않도록 하면서도 상호 슬라이딩하거나 또는 수축할 수 있도록 외부수축관과 내부수축관으로 구성된 그라우팅 압축팩커장치로 이루어진다. 그리고 외부수축관의 외주면에 굴신이 자유로운 실리콘고무로 제작된 원통형의 압축팩커를 삽입하여 결합시킨 후 지상에서 그라우팅 케이싱에 강한 압입을 가하여 외부수축관과 내부수축관이 슬라이딩이 이루어져 수직 높이 방향으로의 수축을 발생시키게 된다.

그 결과로 간격이 좁은 지하수 관정 벽체에 그라우팅 압축팩커장치에 설치한 압축팩커가 서로 겹쳐지고 압축되면서 관정 공벽과 그라우팅 압축팩커장치 사이가 완벽하게 차폐가 이루어지게 된다. 계획깊이에 도달하기

전에 압축에 의한 차폐현상이 발생되지 않도록 하기 위해 안전핀이 삽입된 안전장치가 설치되어 계획된 깊이에서만 압박에 의해 압축기능이 실현되도록 하였다. 특히 폐공(불용 방지공) 원상복구시에 사용되는 경우에는 강한 인장스프링을 삽입 설치하여 계획된 깊이에서 안전핀의 제거만으로 자체 압축에 의한 차폐기능이 확보될 수 있다.

상층지하수 차단원리

압축팩커장치는 그라우팅 케이싱과 동일한 내부 직경을 가지고 상호 슬라이딩하거나 또는 수축할 수 있도록 팩커고무를 장착한 외부수축관과 내부수축관으로 구성되어 있다. 지상에서 안전장치의 해제 후 연결된 케이싱 상단에서 강한 압박을 통해 외부수축관 내부로 내부수축관이 슬라이딩이 이루어져 수축이 발생되고 측면방향으로 압축고무튜브가 확장되어 그라우팅 케이싱과 지하수 관정 공벽 사이를 차폐가 가능하다. 이후 초속경 시멘트 페이스트를 주입하여 양생하고, 시멘트 페이스트를 그라우팅하여 차수벽을 형성한다.

통상의 지하수 개발. 이용시설 설치를 위해 굴착이 이루어지게 되면 그라우팅구간은 암반굴착구간보다 통상 그 직경을 100 mm 크게 굴착하도록 함으로써 그라우팅 두께를 50 mm 이상 유지하도록 하고 있다. 따라서 압축팩커장치를 그라우팅케이싱 최하단에 설치하고 이미 굴착된 지하수 심정 내부로 삽입하여 설치하여 암반 굴착깊이 이상에 위치하도록 한다.

설치가 완료되면 길이방향으로 수축이 일어나게 된다. 이때 길이방향으로의 수축이 일어남과 동시에 너비방향으로는 압축팩커의 직경이 크게 확장되어 압축팩커장치와 지하수 심정 공벽간의 공간을 차폐하여 수밀성을 확보할 수 있다.

압축팩커 및 그라우팅 재료

압축팩커로 재료로 사용되는 것은 실리콘 고무(silicon rubber)로서 인장강도가 96.6 kg/cm^2 이고, 신장율이 590%의 값을 가지며, 수은, 납, 카드뮴, 페놀 등의 중금속의 검출 및 용출이 없다. 특히 압축팩커 재료로 사용되는 실리콘 고무는 비결정성이고 온도 의존성이 적기 때문에 내한성이 모든 종류의 고무에 비해 매우 우수하고 내열성 또한 우수하다. 특히 사용온도의 범위가 $-75 \sim 200^\circ\text{C}$ 에 이르고 있어 속경성시멘트의 양생과정에서 발생할 수 있는 높은 수화열에서도 기능에 장애를 일으키지 않는 재료이다(유기계 고무의 포화점: $-20 \sim -40^\circ\text{C}$,

Fig. 3. The well site and geologic map of the Andong area.

실리콘 고무의 포화점: $-40 \sim -70^\circ\text{C}$). 특히 페닐기를 함유한 실리콘 고무(PVMQ)는 포화온도 -115°C 까지의 초저온에서도 사용이 가능하다. 또한 실리콘 고무는 높은 내열수성을 지니고 있어 장시간 물에 침전되거나 스팀에 접촉하여도 거의 물성변화가 일어나지 않는다. 그 외에도 실리콘 고무는 우수한 탄성을 가지므로 압축팩커의 주요기능이라 할 수 있는 지하수관정 공벽의 차폐에 효과적인 특성을 나타낸다.

지하수오염방지를 위한 그라우팅 및 팩커설치

안동 서후면 자품리

본 조사 지하수공은 안동시 서후면 자품리에 소재하는데(Fig. 3), 이를 대상으로 오염된 지하수공을 개량하고 암반내의 투수특성을 조사하였다. 이 일대의 지질과 수리지질학적 배경은 다음과 같다. 최하부층인 호상편마암은 조사지역의 북단과 중앙부에 관입한 흑운모 화강암에 의해 분리되어 있다. 중앙부의 본 층은 금곡리 편

Fig. 4. Bore hole images show contaminants in the well of the Andong area.

암과 접하는데 이 경계는 점이적이다. 본 암은 엽리의 발달이 뚜렷하며 그 주향은 북쪽에서는 EW~N75°E이고 중앙부에서는 N40~70°E이며, 경사는 북쪽에서는 30~40° NW이나 중앙부에서는 40°~60°NW의 급한 경사를 보인다. 구성광물은 2mm 정도의 석영, 장석, 흑운모가 주이고 소량의 백운모도 함유된다. 흑운모화강암은 본 조사 지역의 중앙 북부 즉 서후면 대두서리 노리간 지역과 풍산읍 지역에 대략 N40°E의 분포방향을 보이는 대상의 암체이다. 우백질화강암은 본 조사지역의 중앙 북부 즉, 부동산, 자품동, 죽전동, 일대에 분포한다. 본 암은 시대미상의 호상편마암을 관입하고 후경상계 흑운모화강암의 관입을 받은 것으로 보인다. 흑운모화강암과 마찬가지로 본 암과 호상편마암과의 경계지역 역시 본 암 내에 편마암의 잔류구조가 많이 남아있다.

먼저 지하수관정의 물리검층 시추공 영상촬영을 실시하였다(Fig. 4). 지하수관정 CCTV 검층조사를 실시하여 판독, 분석한 결과는 다음과 같다. 외부케이싱 설치심도는 2.3m로 확인되며, 팩커그라우팅유니트의 설치심도는 6"×38.7m이다. 주대수층은 15.5, 19.8m에서 발달하고, 약한 대수층 및 78m 부근에서 파쇄대가 관찰되었다.

관정내부에는 오염물로서 부유물이 많으며, 78~81m 부근에서 점토층이 나타나 브리쉬로 씨징을 2회 실시하여 부유물을 제거하였다. 관정의 최종 굴착심도는 132m로 확인되었으며, 케이싱하단에서부터 20m까지 구간에서 오염수의 유입이 확인되어 팩커유니트를 사용하여 오염원을 원천적으로 차단하였다. 전반적으로 관정은 부분적으로 파손되어 있으며, 오염으로 인하여 부유물질이 다수 확인되었다. Fig. 5는 팩커그라우팅 유니트 시공 전, 후의 지하수공의 주요 구간의 특징을 나타낸 것으로 대수층은 3개 구간에서 발달하고 있음을 확인되었다. Fig. 6은 팩커유니트를 설치하고, 공내촬영을 실시한 결과이다. 팩커유니트를 시공한 상태에서는 부유물질이 전혀 발견되지 않았다. 자연수위는 작업 전에는 21m였으나, 시공후에는 11m로 상승하였다. 내부케이싱은 전부 인발하여 시공하였으며, 본 팩커는 38.7m 심도에 설치하였다(Table 1).

충남 연기군 남면 놀왕리

이 지역의 대표적인 지질은 흑운모화강암인데, 이는 본 역의 동부, 즉 충북 청주시, 청원군 강서면, 강내면,

Fig. 5. Cross sections of the well before installation of packer unit (left) and after installation of packer unit (right) in the well of the Andong area.

Fig. 6. Bore hole images after installation of packer unit in the well of the Andong area.

Table 1. Logging results and well information of casing and packer unit for contamination protection.

Date	20 August, 2011	6 October, 2011
Site	Japum-ri, Andong city, Gyeongsangbuk-do	Nulwang-ri, Nam-myeon, Yeongi-gun, Chungnam-do
Well depth	10"×132 m	10"×99 m, 100~150 m 6"
Level before installation	21 m	3.38 m
Outer casing depth	10"×2.3 m	10"×7 m
Inner casing depth	6"×38.7 m, 4"×132 m	8"×99 m
Packer depth	6"×38.7 m	8"×38.71 m

남이면, 남일면, 부용면, 현도면, 문의면 등지에 널리 분포한다(Fig. 7). 본 역의 산계는 북서부 지역의 일부를

제외하고는 평탄한 지형을 이루고 있는데 해발 20~250 m 사이로서, 평균 50~100 m의 낮은 고도를 갖

는다. 경사도 매우 완만하며 북서 지역을 제외하고 경작이 가능하다. 이는 본 지역이 풍화에 약한 조립질 화강

Fig. 7. The well site and geologic map of the Yeongi area.

암이라는 점과 풍화토의 심도가 깊어 토사가 두껍게 집적되는 지형을 이루기 때문이다. 본 역의 수계는 금강의 상류지역이며 수지상 수계이다. 본 역의 전반적인 지질이 화강암이며 큰 지질구조가 없는 이상, 수지상 수계의 발달은 자연스러운 현상이라 볼 수 있다. 본 충적층은 수계에 따라서 운반된 모래 및 자갈, 점토 등의 쇄설물이 그 유역에서 퇴적되어 미고결 퇴적층을 이루고 있다. 암질은 일반적으로 등립질이며 주 구성광물은 석영, 사장석, 정장석, 흑운모, 백운모, 각섬석 등이다. 부 구성광물로는 저어콘, 인회석, 석류석, 자철석 등이 함유되며, 사장석은 주로 이눌사이트이며, 각섬석은 연한 푸른 녹색의 다색성을 나타내며, 정장석은 극히 드문 것이 특징이다.

우선 시추공 공내촬영을 통하여 지하수 관정내부의 착장상태 및 굴착심도 확인하였다(Fig. 8). 이 과정에서 지표하부 차수벽시공의 적합성과 심도확인, 오염지표수 유입여부확인, 관정내부의 수리지질상태, 암반절리층 및 파쇄대 유무 및 부위를 관찰하고 오염원을 진단하였다. 관정은 부분적으로 파손되어 있으며, 오염으로 인하여 부유물질이 다수 확인되었다.

Fig. 9는 지하수관정에 대하여 공내검층, 케이싱, 팩커시공을 설치 전, 후에 CCTV 검층을 실시하여 판독, 분석한 결과이다. 지역의 검층조사 결과 외부케이싱 설치심도가 7m로 확인되며, 팩커그라우팅유니트의 설치심

Fig. 8. Bore hole images show contaminants in the well of the Yeongi area.

Fig. 9. Cross sections of the well before installation of packer unit (left) and after installation of packer unit (right) in the well of the Yeongi area.

Fig. 10. Bore hole images after installation of packer unit in the well of the Yeongi area.

Table 2. Results of water quality before and after installation of contaminant protection.

Sites	Packer effect			Packer depth (m)	Casing diameter and depth (m)	Well diameter and depth (m)
	Contaminants	Before	After			
Changpung-ri, seohu-myeon, Andong	Turbidity	3.21	0.18	6"×38.7	10"×2.3	10"×132
Nulwang-ri, nam-myeon, Yeongi-gun	NO ₃ -N	13.4	5.4	8"×38.7	10"×7	10"×99 m and 6"×100~150 m

도는 8" × 38.71 m이다. 대수층은 22.25, 29.25, 34.65 m로서 큰 대수층 및 파쇄대가 보인다(Table 1). 전체적인 물량은 풍부한 편이며, 팩커유니트를 사용하여 오염

원을 원천적으로 차단한 결과 공내부는 오염원이 없는 것으로 나타났다(Fig. 11).

Fig. 11. Cross section of a well in aquifer.

지하수오염방지시설 설치 전, 후의 효과분석

안동시 서후면 창풍리의 경우 2011. 07. 15~10. 19 기간, 연기군 남면 놀왕리의 경우 2011. 10. 06~12. 28 기간 동안에 지하수오염방지 시설을 설치하고, 설치 전, 후의 주요 수질항목을 분석하고 그 효과를 검토하였다 (Table 2). 이들 지역에서 수질검사항목 중 부적합항목은 안동시 창풍면의 경우 탁도, 연기군 놀왕리의 경우 질산성 질소이다. 안동시 서후면 창풍리의 경우 탁도는 94%, 연기군 남면 놀왕리의 경우 질산성 질소는 60% 감소효과를 나타내었으며, 이로 인해 모든 수질검사항목에서 적합수질을 보였다.

토 의

오염방지시설로서 팩커의 적용성

외부로부터 지하수오염물의 유입 가능성이 높은 관정의 경우 단순폐공보다는 활용정책으로 전환해야 할 시점에 와 있다. 오염된 지하수 관정을 방지하거나, 또 하나의 지하수오염원으로 변한 지하수공은 무용지물인데, 현실적으로 가장 효과적인 기술은 오염물의 유입을 강력하게 차단하는 것이다. 지하수 관정 시설이 오염의 유동에 매우 취약한 상황에 있는 경우 관정 자체가 지표

와 심부 지질환경의 직접적인 유동경로 역할을 하고 있으며, 오염에 취약한 천부 지하수가 지하수 공 내로 유입되기 쉬운데, 특히 케이싱의 노후화, 시설 미비, 소홀한 관리에 의해 이러한 현상이 발생한다(Lee et al., 2010).

불량시공 및 암반관정 내 불량암반 상태에 기인한 오염관정 개선방법으로는 현재 팩커그라우팅방법(Packer Grouting Method), 차폐팩커그라우팅(Protection Packer Grouting)방법 등의 방법이 사용되고 있다. 이들 방법은 기존 문제가 되는 관정에서 공내 TV검층기기를 이용하여 오염물질이 유입되는 공벽의 위치 및 특성을 분석한 후 오염물질 유입부 아래까지 케이싱을 삽입한 후 케이싱 바로 아래 팩커장치로 그라우팅의 차수효과를 극대화시킨 방법이다.

지하수 오염방지시설에 대하여는 지하수법 시행령 제25조 제5항 및 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙 제2조 별표1에 규정되어 있으며 특히 지표하부로부터 상층 오염지하수 유입에 따른 지하수 수질오염을 방지하기 위해 케이싱(지표하부보호벽) 구성 요건을 아래와 같이 규정하고 있다.

- ① 케이싱의 하단부는 지표 이하 3 m 이상 깊이까지 설치하며, 암반층을 굴착하는 경우에는 암반(연암층)선 아래로 1 m 이상 깊게 설치하여야 한다.
- ② 지표하부보호벽(케이싱+그라우팅) 형성을 위한 케이싱 외부의 그라우팅 두께는 5 cm 이상이 되도록 하며, 차수용 재료를 사용하되 케이싱 하부로 누출되지 않도록 하기 위해 케이싱의 하단부에서부터 채워 올려야 한다.
- ③ 취수공 안에 설치하는 양수시설물은 지하수 수질에 무해한 재료를 사용하여야 한다.

본 연구에서 적용한 팩커기술은 상기법령규정에 잘 부합하는데, 구체적인 적용성은 다음과 같다. 본 압축팩커기술은 암반(연암층)선 아래로 1 m 이상 깊게 설치하더라도 손상되거나 기능상실이 되지 않으므로 규정에 적합한 시공이 가능하다. 케이싱 외부의 그라우팅 두께는 5 cm 이상이 될 수 있도록 충분한 압축팽창을 확보하여 차폐시킬 수 있어 관련 규정을 충분히 충족시킬 수 있다. 케이싱 하부로 그라우팅을 위해 사용되는 차수용 재료인 시멘트 액이 누출되지 않도록 완벽하게 차폐된다. 오염상층 지하수의 유입이 관정 내부로 유입되지 않도록 차폐할 수 있어 지하수 오염을 방지할 수 있다. 인체에 무해한 실리콘 고무제재를 사용하여 압축팩커를 제

Fig. 12. Improper casing in confined aquifer with fractured rocks is susceptible to the inflow of contaminants.

작함으로 지하수 수질에 무해한 재료를 사용하도록 한 관련규정을 충족하고 있다. 이를 적용한 본 연구에서도 이 같은 수질개선 효과가 잘 나타나고 있음을 볼 수 있다. 범국가적 차원에서 지하수오염 방지시설을 검증하고 표준화할 필요가 있다.

현행 지표하부보호벽 시설기준과 문제점

지표하부보호벽 시설의 시행목적은 지표 또는 지중의 오염물질이 지하수 관정 내부로 유입됨으로써 지하수가 오염되는 것을 방지하기 위한 것이다. 지하수 오염방지 작업은 각각의 지하수의 다양한 오염원 인자를 파악하는 것으로부터 시작되어야 함에도 일률적인 방지시설을 설치하는 경우가 허다하다. 오염원은 다양한 근원으로부터 발생하여 수리지질학적 특성에 따라 유동하여 지하수로 유입된다. 현실적으로 국내의 많은 지하수공, 특히 농업용 천부지하수공의 경우 상부케이싱이나 배관의 이음새가 불량하고, 녹이 슬어 있다. 또한 지표하부보호벽 시설에 대하여서는 일률적인 기준을 제시하고 있는데, 암종과 풍화심도, 및 절리나 파쇄대에 따른 대수층의 발달특징을 전혀 고려하지 않고 있다. Fig. 11은 기존의 관정오염방지 시공사례 단면도이다. 이 경우 연암까지 케이싱을 설치한다 하더라도 케이싱 아래의 암반 상태에 따라 오염의 정도는 크게 달라질 수 있다. 특히 파쇄대가 발달한 피압대수층인 경우 비록 암반지하수이더라도 지표오염물이 절리나 구조선과 같은 파쇄대를 따라 지하수로 유입될 수 있다(Fig. 12). 이 경우 단순히 경암(hard rock)이라고 부르는 암반선까지만 케이싱 처리를 하게 되면 오염물이 유입될 가능성이 높다. 이처럼 종래의 시설기준은 대수층의 상세한 특징별로 규정되지 않았기 때문에 심각한 오류를 범할 수 있다. 암반관정에서는 연암심도까지 차단하는 케이싱 설치가 중요한 것

이 아니라, 연암의 파쇄정도, 즉 불연속면의 발달정도가 매우 중요하다. 또한 동일한 암질이더라도 풍화심도, 파쇄대의 발달이 다르므로 대수층의 특징은 상당히 달라질 수 있다.

그러므로 총적층 지하수일 경우 퇴적특성에 따라 케이싱 및 그라우팅 범위 결정해야 한다. 연암의 발달심도, 위치, 공벽을 관찰(풍화정도 및 균열 빈도)하여 케이싱 심도를 결정하도록 해야 한다. 즉 피압대수층일 경우 지질 및 지질구조 특성을 확인하여 케이싱 및 그라우팅 범위를 결정해야 하며, 연암인 경우 기반암 상부(연암)에서의 투수시험에 따라서 범위를 결정해야 할 것이다. 특히 지질구조를 기본으로 풍화심도, 파쇄대의 발달 정도, 수리경사를 고려한 그라우팅 심도결정, 케이싱 작업 등이 요구된다.

현실적으로 질산성질소나 탁질물로 오염된 지하수공의 수질을 개선시킬 수 있는 효과적인 방법은 압축팩터를 이용하여 상부의 오염지하수 유입을 차단하는 것이다(Seong et al., 2000; Cho et al., 2003, 2009; Lee et al., 2010). Lee et al.(2010)에 의하면 압축팩터 그라우팅 공사를 하기 이전에 먼저 예비팩터를 설치하고 예비팩터 상, 하부의 질산성질소 함량을 분석하여 최적의 그라우팅 실시 지점과 압축팩터 장치 설치 지점을 선정하는 것이 효과적인 방법인데, 질산성질소 이외에도 암모니아성질소 및 탁도 등과 같이 외부 오염물질이 공내로 유입되어 오염된 지하수공에 효과적으로 적용될 수 있는 것으로 나타났다. 차폐장치를 설치하게 되면 오염방지를 위한 지표하부보호벽 설치여부를 차폐장치 투입으로 확인이 가능할 뿐 아니라 설치깊이를 정확히 확인할 수 있어 차수벽의 부실한 시공을 사전에 예방할 수 있게 된다.

그런데 국내 각 지방자치단체들의 경우 설치깊이를

각각 다르게 적용하고 있다. 예를 들면 제주도에서는 차폐장치의 설치심도를 89m에서 하도록 특별법에 규정하고 있으며, 대구시는 60~80m, 안동시는 50m, 보은군은 30m 심도에 설치하고 있다. 이같은 조치는 나름 적절하게 보일 수 있으나, 이것도 대수층의 발달상태와 지질과는 무관한 기준이다. 따라서 차폐장치의 설치 깊이는 지하수영향조사결과에 의해 대수층의 지질과 지역적인 상황에 따라 각각 달리하도록 해야 할 것이다.

지하수오염의 대표적인 원인은 관정 자체의 불량에 의한 것이 대부분이므로 지하수공은 반드시 사후관리를 받도록 해야 한다. 주기별로 공내촬영을 하며, 시공불량, 관정의 노후화에 따른 제반 문제점을 점검하고, 이를 보완하도록 해야 한다. 착정 시에는 반드시 공내촬영과 텔레뷰어에 의한 절리분포, 경사, 파쇄대의 밀도를 확인하여 투수특성을 분석한 후, 파쇄대 구간을 차단하는 심도를 산출하며, 최종적으로 케이싱 심도를 결정해야 할 것이다.

결 론

본 연구에서는 경북 안동시 서후면, 충남 연기군의 오염된 지하수공을 대상으로 하부 지하수오염방지시설로서 적절한 그라우팅과 팩커의 적합성을 검토한 결과 그 효과는 우수한 것으로 나타났다. 그런데 현행 지하수법에서는 오염방지 시설에 관한 개략적인 설치규정만이 설정되어 있어서 현재 널리 사용되고 있는 지하수오염방지 시설은 그 기능을 효과적으로 발휘하기가 어렵다. 지하수 오염방지 시설은 상부보호공과 케이싱에 주안점을 두고 있는데, 대수층의 특성을 고려하지 않은 일률적인 오염방지 시설 기준은 지질에 따라 다양하게 발달하는 우리나라의 지하수자원을 안전하게 보호해 주지 못한다. 정확한 관정카메라 촬영과 오염원 모니터링 분석을 실시하고, 이에 근거하여 풍화대심도, 파쇄대 발달, 대수층의 수리경사를 파악한 후, 지하수오염 가능성을 평가하고, 이를 통하여 적절한 그라우팅과 케이싱 작업이 이루어져야 한다. 유용한 대수층 구간을 확보하여 오염물을 차단하는 그라우팅, 팩커장치, 케이싱은 지하수의 활용과 오염방지에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 환경부 토양·지하수오염방지기술개발사업

(GAIA)의 “2010년 지하수 오염방지시설 설치기준 개선 연구”에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드린다.

References

- Cho, H. -N. and Choi, S. -I., 2010, Development of the compressed packer grouting device for preventing the inflow of polluted groundwater, The Journal of Engineering Geology, 19, 433-439.
- Cho, H. -N., Cho, Y. -C., Kim, J. -Y. and Choi, S. -I., 2009, Groundwater quality evaluation, for upper and lower aquifers of contaminated groundwater well using preliminary packer, Journal of Korean Society of Soil and Ground water Environment, 14, 73-77.
- Cho, H. -N., Seong, I. -H., Lee, B. -D., and Cho, B. -U., 2003, A study on installation and application of facility to prevent contamination using a packer technique, Proceeding of KSSGE 2003 Spring Conference, 77-81.
- GIMS (National Groundwater Information Management and Service Center), 2008~2011, Groundwater Statistics (2008~2011), Ministry of Land Transport and Maritime Affairs, K-Water. Web Access: <https://www.gims.go.kr>
- Lee, B. -D., Cho, B. -U., Seong, I. -H., Ham, S. -Y., Jeong, S. -Y., and Yun, S. -T., 2002, A recovery study on groundwater system using facility to prevent contamination, Proceeding of KSSGE 2002 Spring Conference, 155-158.
- Lee, B. -D., Yun, U., Yun, S. -T., and Cho, H. -N., 2010, Improvement of water quality for contaminated groundwater by NO₃-N using compression packer in Boeun, The Journal of Engineering Geology, 20, 25-33.
- Seong, I. -H., Kim, S. -Y., Kim, S. -J., Kim, Y. -K., Kim, T. -G., Kim, H. -C., Ryu, C. -R., Seong, G. -S., Song, G. -S., Song, D. -Y., Yun, U., Lee, B. -D., Lee, B. -J., Lee, J. -H., Lee, J. -C., Lee, C. -O., Lim, H. -C., Jeon, C. -W., Cho, B. -U., Cho, M. -J., Ji, S. -J., Choe, B. -I., and Sim, B. -W. 2003, Study on the groundwater remediation in urban area, KIGAM, pp. 289.
- Seong, I. -H., Lee, B. -D., Cho, B. -U., Ham, S. -Y., Choo, C. O., Kim, J. -S., and Lee, I. -H., 2000, A case study on remediation and improvement of contaminated groundwater, Proceeding of KSSGE 2000 Spring Conference, pp. 90.

원고접수일 : 2013년 8월 30일

수정본채택 : 2013년 9월 26일

게재확정일 : 2013년 9월 26일

추창오

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경상북도 안동시 경동로 1375번지
Tel: 010-6656-3582
E-mail: mineralogy@hanmail.net

류종흠

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경상북도 안동시 경동로 1375번지
Tel: 054-820-5158
E-mail: goodrjh007@naver.com

조희남

(주)지앤지테크놀로지
405-849 인천광역시 남동구 논현동 435-5
Tel: 032-812-0777
E-mail: ggpgu@hanmail.net

정교철

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경상북도 안동시 경동로 1375번지
Tel: 054-820-5753
E-mail: jeong@andong.ac.kr