한국환경과학회지 제16권(제6호), 735~743, 2007
Journal of the Environmental Sciences

제주도 지하수관정의 오염저감방안

양 성 기 · 한 상 철*
제주대학교 토목환경공학과, *장원건설(주)
(*2007*년 *3*월 *12*일 접수; *2007*년 *5*월 *31*일 채택)

Improvement Method for Preventing Groundwater Pollution in Jeju Island

Sung-Kee Yang and Sang-Cheol Han*
Division of Civil & Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea
**Jang Won Construction Co., LTD., Jeju 690-833, Korea*
(Manuscript received 12 March, 2007; accepted 31 May, 2007)

A grouting method is the way to effectively prevent pollutants from spreading into the ground during the digging process of groundwater. This study, based on the comparative study of grouting methods being generally accepted, suggests various construction methods which are suitable for geological structure as follows: In Jeju Island, it is very likely that rocks may fall in shuttered zones such as cracks, joints, scoria layers, and clinker layers. For this reason, it is recommended that materials be injected from the bottom toward the top, not from the top to the bottom. In the case where the amount of injected materials become too large in the areas of cracks or joints because of high level of permeability coefficient, grouting materials which smeared into surrounding areas may cause unwanted cut in the aquifer of the bottom level. To avoid this, the amount of water should be reduced from the typical water-cement ratio of 1:2, and grouting materials with larger grading should be used. If the deep excavation of ground is made in Jeju Island, it is likely to have lots of voids because of geological characteristics. Based on the results of this research, it is found that to construct interior casing, the centralizer should be attached to the casing to prevent the casing from being in contact with the counter fort. The grouting in Jeju Island should be thicker than usual. To avoid over-use of grouting materials, to prevent grouting in more than necessary zone, and to facilitate grouting of void areas, the flexible selection of materials is required. And, to exactly figure out the interior of dug well, an examination through CCTV should necessarily be performed when grouting work is in progress.

Key Words : Preventing groundwater pollution, Grouting method, Aquifer, Permeability coefficient, Injection methods

1. 서 론

인류의 생활에서 물은 없어서는 안 되는 귀중한 생명자원이다. 세계문명의 발상 지역들 역시 물을 취수하기 쉬운 커다란 강가 주변지역에서 발전해 왔으며, 그러한 물을 잘 다스리기 위한 방법을 개선하고 찾아가면서 인류는 발전해 왔다고 할 수 있다. 최근 들어 이러한 물의 중요성은 더욱 강조되고 있다. 산업구조의 발달과 인구의 증가, 농경지의 확대와 지하수의 무분별한 개발 및 과잉양수 등으로 다가오는 미래에 언제 닥쳐올지 모르는 물 부족현상과 지하수 오염 등에 보다 효과적으로 대처할 수 있는 방안들이 요구되고 있는 실정이다. 특히, 수량 확보 보다는 수질보호에 더 관심을 갖게 되면서 오염원이 배출되는 지점의 시설에 대한 규제도 중요하지만 취수정 자체에서 양질의 물을 취수해야함은 물론, 굴착공 자체가 지표의 오염물질이 유입되어

Corresponding Author : Sung-Kee Yang, Division of Civil & Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone: +82-64-754-3451
E-mail: skyang@cheju.ac.kr

대수층으로 연결되게 하는 오염통로 역할을 할 가능성이 있으므로 굴착공에 대한 오염방지시설 관리가 중요시되고 있다[1,2].

지하수 굴착공의 오염방지시설은 상부 보호공의 처리는 물론, 굴착공벽과 케이싱 사이를 통해 쉽게 오염물질이 유입되므로 이들 구간에 그라우팅을 실시하는 것이 오염물질 유입을 차단시키는 근본적인 방법이라 할 수 있다. 이들 오염방지 그라우팅의 공법은 댐 · 저수지 · 교량 · 건축물 등의 구조물에 적용되는 일반적인 보강 및 차수그라우팅의 다양한 공법 중에 극히 일부분에 해당되며, 지하수법 상에 규정되고 있는 오염방지에 관한 그라우팅 공법 또한 가장 일반적인 몇 가지 공법만을 제시하고 있을 뿐이다.

제주도는 대부분 투수성이 높은 다공질의 현무암질 용암류로 이루어져 있으며, 지표 상에 각종 투수성 지질구조들이 분포하고 있는데, 이러한 지질구조는 지하수의 함양에 기여하고 있으나 오염물질이 여과되지 않고 직접 지하수체로 유입되는 통로 역할을 하므로 오염에 매우 취약한 구조라 할 수 있다. 따라서 지하수 부존량이 많고 지하수를 가장 많이 사용[3]하고 있는 제주도에서 지하수를 좀더 효율적이고 안전하게 이용할 수 있는 방법을 연구할 필요가 있다. 그러나, 지질구조가 육지부와 상이한 제주도 지역에서 충적층 및 화강암 지대 지하수를 기준으로 제시된 기존의 그라우팅 공법을 그대로 적용시키는 것은 무리가 따르며 대수층 · 저투수층이 반복적으로 분포될 뿐만 아니라, 공동구조 및 수많은 균열 · 절리를 포함하는 제주 화산지질구조에 적합한 공법을 검토해 볼 필요가 있다[4].

이 연구에서는 제주도 지하수관정에 오염물질이 유입되는 1차적인 지질구조 외에, 굴착과정에서 공벽 및 케이싱 주변에 생기는 2차적인 오염경로를 차단시키기 위한 지하수 그라우팅 공법과 일반적으로 시공되고 있는 그라우팅공법을 조사하여 검토한 후, 제주도의 지하수 그라우팅에 사용되고 있는 기존 방법들의 문제점을 분석하여 제주도 지질구조에 적합한 그라우팅 방법을 제시 하였다. 또한, 오염방지 그라우팅의 정형화된 주입방법 및 주입재에 대한 자료는 전무한 실정이며, 이에 따른 실제 오염방지 그라우팅 실험을 통한 데이터의 수집은 현실적으로 어려움이 있는 실정이다. 따라서 문헌조사를 통해 일반적인 그라우팅 공법을 검토하고, 현재 이용되고 있는 채움그라우팅공법과 트레미방법(Tremie Method)의 시공법에 대해 시공 실례를 바탕으로 문제점을 파악하여 분석하였다. 또한, 제주도 화산지질의 특성(Fig. 1)을 보다 구체적으로 파악하기 위하여 현장의 투수시험을 통한 투수계수를 산정하였으며 개발된 기존관정들의 지질과 지층의 분포특성을 참고로 하였다. 또한, 기존에 적용되고 있는 그라우팅 공법의 문제점을 도출하여 제주도 지질구조의 특성에 적합한 지하수관정의 오염방지공법 및 시공 방법을 제시하였다.

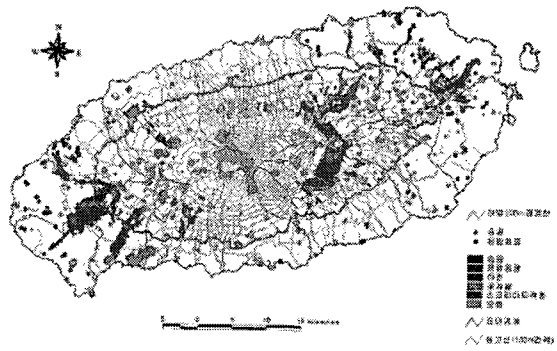

Fig. 1. Distribution map of the permeable geologic structure of Jeju Island (Jejudo, 2000).

2. 지하수의 그라우팅과 주입재

2.1. 그라우팅과 입지조건

그라우팅이란 지반 혹은 암반내로 액상이나 Gel상의 Grout재를 주입시켜, 공기나 물로 차있는 균열 • 공극을 채워 고결시킴으로서 지지력을 증대시키는 가장 보편적인 공법이다[5,6]. 그라우팅을 하는 목적은 연약한 지반을 고강도의 물질로 채움 · 응결시킴으로써 지지력을 증대시키는 것과, 느슨한 상태의 지반을 치밀한 그라우트재로 채움으로써 누수를 차단시키는 차수 그라우팅의 두 가지 목적으로 크게 구분시킬 수 있다. 여기서, 지하수 개발에 적용되는 그라우팅은 오염물질 유입방지를 위한 것으로 크게는 후자에 해당되는 차수그라우팅 개념이라고 할 수 있다. 주입 그라우팅공법에는 주입대상지반, 주입재료, 주입목적 등에 따라 여러 가지가 있다. 이들 다양한 공법 중 지하수의 오염방지를 목적으로 이용되고 있는 공법을 중심한 입지조건의 조사항목으로는 입지조건의 조사, 환경조사, 토질조사, 그라우트에 대한시험과 주입시험, 시공관리, 효과의 확인, 기록과 보고 등으로 나누어 고려해야 한다.

2.2. 주입 그라우팅 공법과 주입재

그라우팅 실시시기에 따라 pre-grouting, after-Grouting과 주입방법에 따라 상향식주입공법, 하강식주입공법, 압력관리주입공법 및 파카공법 등이 있다[7]. 주입대상 지반에 따라 사력층 주입(연약지반, 충적층, 붕괴암석 및 토사), 암반 주입(암반 균열),

단층 파쇄대 주입, 경계(지층 이음매) 주입이 있다. 주입재에는 시멘트계 : 차수 및 지반강화를 위해 사용하며 필요시 벤토나이트, 톱밥, 물 유리계 약액을 혼합하여 사용할 수 있는 시멘트계와 차수 및 막장 천단부 안정화 등에 사용되는 고분자 우레탄 등이 있다.

심층혼합처리 공법은 석탄이나 시멘트계를 괴상, 분말상 또는 현탁상태의 화학적 안정재를 심층의 지반과 혼합하여 고화처리하는 공법으로서 대표적인 개량 형식은 Block식과 벽식이며 또한 주상식도 활용되고 있다. 주입재에는 재료, 반응형식, 적용방식, 주입 목적이나 효과, 겔시간 등의 인자로 분류할 수 있다.

사질지반에서 차수를 목적으로 할 경우에는 지반으로의 침투성을 고려하여 주입재를 선정한다. 용수에 대한 응급처치로서는 겔시간 짧은 약액이 효과적이지만 지반의 수밀성을 높이기 위한 계획 주입에서는 겔시간이 긴 약액으로 토립자 사이의 침투를 꾀하는 것이 바람직하다. 점토성 지반인 경우에는 현탁액형 약액이나 겔시간이 짧은 약액에 의한 맥상주입이 효과적인 경우가 많다(Table 1). 주입재는 지하수의 수질에 따라 상당히 다른 반응을 나타낸다. 즉, 알칼리성 주입재와 중성 주입재가 지하수의 산도(pH)에 따라 겔시간이 다르게 나타난다(Table 2).

토층과 주입형태에 대해서는 그라우트재를 지반 속에 주입하며 그라우트재는 지반의 종류나 주입조건에 의해서 각기 침투, 할열, 할열침투 등의 형태로 지반 속에 들어가서 겔타임 경과 후 고결하여 투수성의 저하나 강도증가의 주입효과가 생긴다. 투수계수가 꽤 다른 호층에 주입하는 경우는 침투하기 쉬운 토층에 우선해서 그라우트재가 들어가서 그 토층이 다층의 그것과 동정도가 되지 않는 한 타층에 주입되지 않으므로 특히 주입방식, 주입간격, 주입스텝 등을 적절하게 고려할 필요가 있다[8,9].

Table 1. Standard grout materials based on the type of ground

Injection / gel time / Ground condition	Suspension type		Solution type	
	long	short	long	short
Clay~Silt	×	○	×	×
Granule sand	×	×	○	△
Coarse grain sand	×	△	○	○
Gravel & Sand	△	○	△	○

○: High aprication, △: Middle aprication,
×: Low aprication

Table 2. Changes of gel time by groundwater pH

Division	Groundwater pH	Gel time
Alkaline grout material	Acid	fast
	Alkaline	late
Natural grout material	Acid	late
	Alkaline	fast

3. 지하수의 오염방지 공법

3.1. 지하수법에 의한 그라우팅

우리나라 지하수법[10]에 의하면 지하수 개발·이용시설을 설치하는 경우 지표 또는 지하로부터 오염물질 유입을 방지하기 위한 시설 중 지하심부에 관한 사항으로는 첫째, 지하수 개발·이용시설의 지표하부 보호벽(케이싱) 깊이는 3 m 이상으로 설치하며 암반층 이하 깊이로 굴착하는 경우에는 암반선까지 설치한다. 다음으로 지하수 개발·이용시설의 지표하부 보호벽(케이싱) 외부의 그라우팅은 두께 5 ㎝ 이상이 되도록 하여, 차수용 시멘트로 밑에서부터 충진하는 것으로 규정하고 있다.

상기에 제시된 것을 주 골자로 한 지하수법에 의하면 취수정 설치를 위한 토지굴착 후 케이싱을 설치하고 나면 토지굴착부위와 케이싱사이에는 공간이 발생하게 되는데 이 주변공간이 5 ㎝ 이상 되도록 굴착을 하고 차수용시멘트(체적상으로 3%의 벤토나이트를 함유한 시멘트, 물과 시멘트 혼합물의 중량비 = 1:2)로 주입하여 그라우팅을 실시하도록 하고 있다(Fig. 2). 이 때 케이싱이 길어지는 경우 스프링성능을 갖고 있는 중심틀(Centralizer)을 케이싱 용접시마다 케이싱 외부(4군데씩)에 부착하여 케이싱이 중앙에 위치하게 하고 차수용시멘트가 균일하게 부설될 수 있게 함으로써 그라우팅의 효과가 충분히 나타날 수 있도록 한다. 또한, 차수용시멘트를 주입하기 전에 청수나 착정용수를 공저(밑바닥)로부터 역순화시켜 주변공간을 깨끗이 청소해야 하고, 그라우팅은 케이싱 외부 밑바닥 주변공간부터 차수용시멘트가 하부에서 상부로 충진 되도록 역압력(압축공기에 의한 역순환)방법으로 실시해야 하며, 주입시멘트가 지표로 역류될 때까지 시행하도록 하고 있다.

3.2. 제주국제자유도시특별법에 의한 그라우팅

제주도는 수원 공급원의 대부분을 의존하고 있는 지하수 자원을 보호하는 노력이 계속되고 있으며, 2000년과 2002년에 각각 개정된 제주도특별법[11]과 제주국제자유도시특별법[12]상에는 지하수 개발에 따른 규제를 강화시키고 있다. 개정된 특별법과 관련

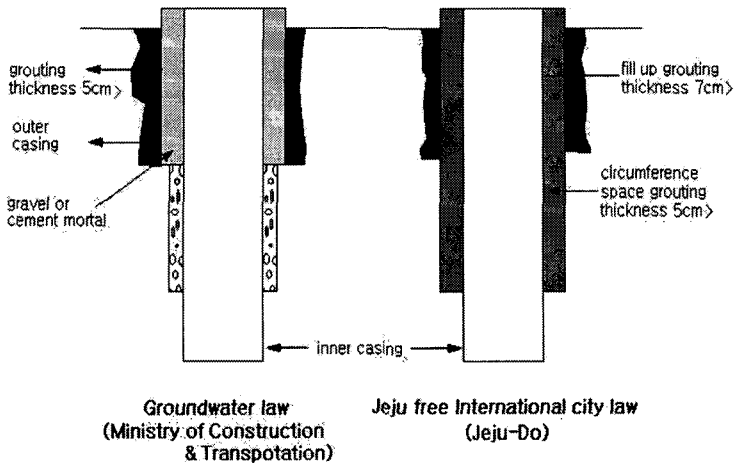

Fig. 2. Underground technique and standard equipment for groundwater well by the groundwater low of the Ministry of Transportation and Construction(left) and the special law of Jeju free international city(right).

하여 제주도지하수 개발·이용시설 등의 기준을 제시하고 있고, 그 기준상에 규정하고 있는 그라우팅에 관한 사항은 지하수법과는 다소 차이를 보인다.

그 주요사항은 지표면으로부터 최소 30 m 이상(주대수층이 30 m 이내에 분포하고 있을 경우는 주대수층 상부까지)은 반드시 채움그라우팅을 실시하도록 하여야 하며, 케이싱파이프 설치 후 굴착공벽과 케이싱 파이프 사이의 주변공간 그라우팅은 지표면으로부터 주대수층 상부까지 시공하여야 하고, 그라우팅 시공을 해야할 심도가 너무 깊어 시공이 불가능하다고 판단될 경우 지표로부터 최소 50 m 구간은 반드시 실시하도록 하고 있다(Fig. 2). 또한 주변공간 그라우팅 시 그라우트재가 대수층으로 유입되는 것을 방지하기 위하여 그라우팅 심도 최하부면에 packer(밀봉장치)를 장착하여야 하며, 그라우트 재료는 tremie pipe 등을 이용하여 바닥에서부터 상향식으로 지표로 역류될 때까지 주입시켜야 한다. 그라우팅 두께는 채움그라우팅 구간은 최소 7 ㎝ 이상, 주변공간 그라우팅 구간은 최소 5 ㎝ 이상되도록 하여야 하며, 그라우팅 재료는 지하수법과 동일조건으로 제시하고 있다[11,12]. 제주국제자유도시 특별법상에 규정하고 있는 그라우팅의 가장 큰 특징은 채움그라우팅과 주변공간 그라우팅의 단계적 시공에서 그라우팅 두께를 충분히 확보하도록 하고 있다.

3.3. 지하수의 그라우팅 시공방법

지지력 증대 및 차수를 목적으로 하는 그라우팅 공법에는 수많은 종류가 있으나, 대부분이 댐이나 저수지, 교량, 건축물 등의 구조물 시공에 적용되는 공법이며, 실질적으로 지하수개발에 따른 오염방지용 그라우팅 공법에 적용되는 사항은 극히 일부에 불과하다. 주입 그라우팅 중에서도 일반적으로 이용되는 지하수 그라우팅 공법의 종류는, 시멘트와 모르터, 벤토나이트 등을 주로한 주입재에 따른 공법과 공내로 응결제를 주입하는 형태에 따른 수 개의 공법이 전부이다.

지하수개발은 지표에서부터 심부로 굴착하여 공간을 형성하고 그 공간을 통해 대수층 구간의 지하수를 끌어올려 이용하도록 하는 것이다. 굴착공 내로 지표오염원이 유입되는 1차적인 통로는 케이싱과 공벽사이의 공간인 애놀러스(annulus)를 통해서이며, 따라서 지하수 개발 시 반드시 그라우팅을 하여 이 공간을 밀폐시켜야 하는데 이 것이 곧 애놀러스 시멘팅(그라우팅)이라 한다. 공내의 공벽과 케이싱 사이 주입되는 응결제의 주입형태에 따른 공법에는 브레든헤드 방법(Bradenhead Method)과 트레미 방법(Tremie Method)으로 나누고 있다.

브레든헤드 방법은 케이싱 상부에 부레든헤드 또는 시멘트헤드를 밀착시켜 케이싱 내부에서 애놀러스쪽으로, 지표하부에서 상부로 시멘팅하는 방법이며, 트레미 방법은 트레미 또는 그라우트 파이프를 애놀러스 부분 하단에 위치시키고 이를 통하여 시멘트를 애놀러스 하부에서부터 상부로 주입하는 방법이다(Fig. 3). 브레든헤드 방법 및 트레미 방법은 모두 지하심부에서 상부로 채워지는 상향식 주입공법이며, 지표에서 투하하는 채움 형태 그라우팅의 문제점을 보완시키는 방법이다.

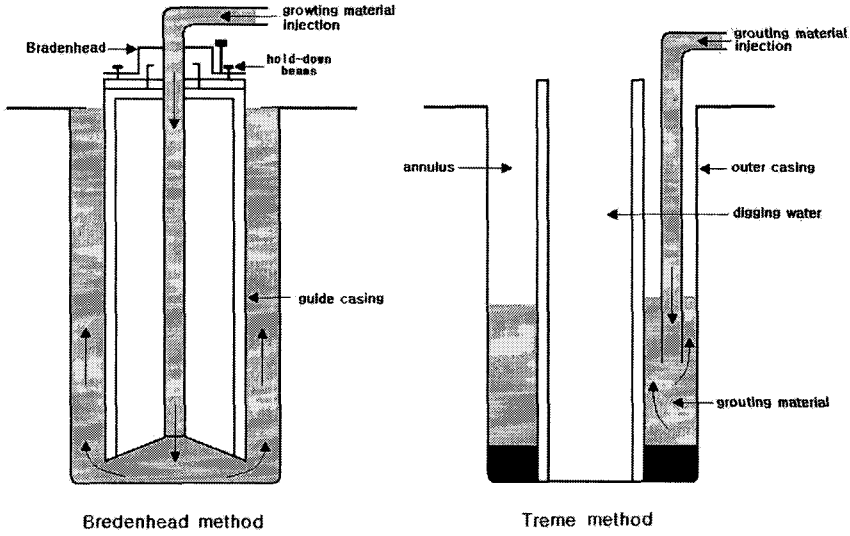

Fig. 3. Schematic presentation of a bottom-up pouring method in grouting.

4. 제주도 지하수의 오염방지 시설현황과 문제점

4.1. 지하수의 그라우팅 현황

신생화산도인 제주도의 지하수는 크게 상위지하수, 준기저지하수, 기저지하수의 부존형태를 보이고, 세부적으로는 수매의 저투수층 및 대수층 역할을 하는 지층이 반복적으로 분포되는 특성을 갖는다. 오염원과 쉽게 접촉되는 상부 지층이 오염경로가 되며, 숨골, 곶자왈, 용암동굴 등의 공동구조가 오염통로 역할[13]을 할 뿐만 아니라 상부에 형성된 대수층 구간 또한 이동 경로가 되어 이들 모두가 오염방지 그라우팅의 대상층이 된다. 지하수개발 시 그라우팅의 목적은 오염물질 유입을 방지시키는 데에 있으나, 지하수 이용의 대상이 되는 대수층을 보호해야하는 기본사항이 전제되어야 그 시공가치가 있는 것이다.

Fig. 4는 육지부 충적층 지하수개발과는 차이를 보이는 제주도 지하수개발공의 그라우팅 대상층 및 지층모식도를 간략하게 제시하고 있다. 시공2와 같이 지표처리 외에 그라우팅을 실시하지 않을 경우는 오염물질이 쉽게 유입되고, 유입된 오염물질이 공벽과 케이싱외벽 사이의 공간을 통하여 심부로 이동되어 이용대상이 되는 하부대수층구간까지 오염시키는 경로를 보여주고 있으며, 따라서 상부 대수층 차단의 필요성을 동시에 보여주고 있다. 시공 1 및 시공 2는 지표에서부터 상부대수층 구간은 물론 균열 및 절리를 포함하지 않는 심부 저투수층까지 그라우팅을 실시한 것을 나타내고 있으며, 시공1에 비해 시공3의 굴착공은 상부대수층 구간이 협소하나 이들 또한 오염물질 이동경로 역할을 하기에는 충분한 구간이므로 차단시키고 있다.

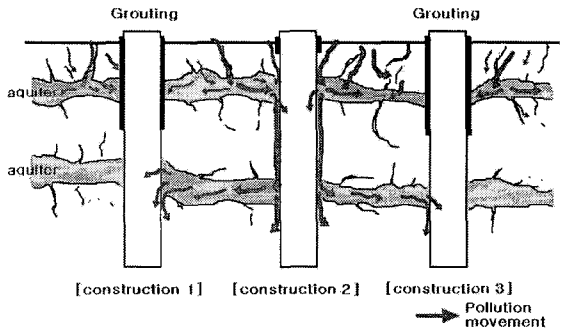

Fig. 4. Effector of the different grouting conditions.

4.2. 그라우팅 공법의 문제점

4.2.1. 주입공법상의 문제점

지하수법 및 제주도 특별법 상에는 그라우팅을 트레미 파이프 등을 이용한 상향식 주입을 하도록 규정하고 있으나, 일반적인 시공 시에는 상향식 주입 외에, 상부에서 그라우트재를 투하시켜 채우는 형식도 많이 적용되고 있다. 여기서는, 육지부의 지하수 개발공 상부구간에 공벽과 케이싱 사이에 실시되는 채움그라우팅과는 다른 의미로 주입방법에 따른 채움그라우팅 공법을 뜻하는 것이며, 그라우트재를 지표에서 투하하여 하부에서 상부로 over flow(월류) 시키는 방법으로 시멘트 혼합물의 혼합비에 따라 수밀성의 차이가 크게 된다.

이 방법의 문제점은 첫째, 수위하에서 그라우팅이 이루어질 경우, 시멘트혼합물의 투하 중 혼합물이

분리현상을 일으켜 그라우팅이 이루어지지 못하게 된다. 둘째, 슬라임 및 낙석 등으로 인해 공동이 발생할 우려가 있다는 것이다. 셋째, 공벽의 절리구간이나 파쇄구간에는 그라우트재의 침투가 용이하지 않다. 이에 따라, 지하수법 및 제주도 특별법 상에는 트레미 파이프 및 그라우트 파이프를 이용한 상향식 주입공법을 규정하고 있으며, 특히 굴착공벽의 지층이 붕괴될 가능성이 많은 제주도 지하수 개발에 있어서는 그라우팅 대상심도까지 주입파이프를 삽입하여 상향식으로 실시해야 하는 것은 불가피한 사항이다. Fig. 5는 트레미 파이프를 이용하지 않고 상부에서 그라우트재를 투하시키는 채움그라우팅 시 파쇄대 구간에서 낙석되는 모식도를 보여주고 있다.

육지부 충적층 지하수와 비교하여 제주도 지하수 개발 그라우팅 시공 시 문제가 되는 사항은, 첫째로 상부 구간에서 유입되는 지하수량이 많아 그라우트재가 분리될 가능성이 있으며 둘째, 클린커구조 및 스코리아층이 분포되고 균열 및 절리구간이 많아 그라우팅 시 세굴 또는 낙석될 우려가 있다. 이에 따라 급결제를 사용하는 경우가 많은데, 급결제 사용 시 발생되는 문제점은 응결, 경화시간의 단축으로 양생시 과도한 수축 균열이 발생되어 grouting의 목적 및 기능이 상실할 우려가 있고, 초기 양생기간의 압축강도는 증가하나, 양생기간이 지날수록 혼합재(급결재) 미사용 시보다 강도가 떨어지게 된다. 또한, 그라우트재에 대한 급결제의 혼합비와 그 효과에 대한 실적용 사례가 없어 적용에 어려움이 따르고, 급결제 사용으로 인한 응결, 경화시간의 인위적 변화로 그라우팅 시 몰탈 주입량에 따른 mortar 배합 생산량의 정확한 조절이 필요하나 이의 조절에 많은 어려움이 따를 것으로 예상된다.

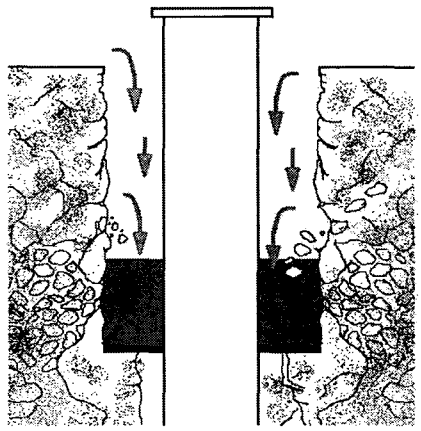

Fig. 5. Schematic presentation of falling rock state in a fractured zone section.

4.2.2. 주입재료상의 문제점

그라우팅의 용액형 주입재는 $k=10^{-3}$ ㎝/sec의 투수계수를 가진 지반에 적합하며, 일반적으로 지하수 오염방지 그라우팅에는 현탁액형 주입재를 이용하도록 규정하고 있다. 제주도 특별법 상에 제시된 주입재 차수용시멘트는 체적상으로 3%의 벤토나이트를 함유한 시멘트, 물과 시멘트 혼합물의 중량비 = 1:2로 규정하고 있다. 그러나, 이들 규정은 육지부의 충적층 및 화강암 지대 지하수를 기준으로 하여 적합한 재료를 설정한 것이며 균열 및 절리가 발달한 현무암류가 주를 이루는 제주도 지질특성상 동일의 것을 적용시키는 것은 무리가 따른다.

제주도에서 개발 · 이용되고 있는 지하수관정에는 그라우팅 시 공동구간의 분포에 따라 그라우팅의 주입량이 큰 차이를 나타낸다. 따라서 지하수 굴착경 및 정호경(내부케이싱)의 구경이 동일하고 그라우팅 심도가 비슷한 경우에 실제적으로 그라우팅 시 주입되는 mortar량은 큰 차이를 보일 수 있다. 지하수 관정의 균열 및 절리가 발달된 구간이 있으면 이 구간에서 주입재가 주변공간으로 유실되기 때문에 공동구간의 분포를 정확히 파악하여야 한다.

지하수관정 개발 시 균열 및 절리가 발달되고 연 · 경이 교호될 뿐만 아니라 화산쇄설층 등의 미고결층 및 암반층이 교호되는 제주도 지질특성상 지하심부로 굴착할 경우 공이 휠 가능성이 많다. 이에 따라, 굴착 후 내부 케이싱을 설치할 경우 케이싱이 hole 중심에 설치되지 못하고 한쪽으로는 공벽에 닿게 되는 현상이 발생 할 수 있다. 이 같은 경우 그라우팅을 실시하더라도 일정한 두께를 유지하기 어려우며, 케이싱과 공벽이 닿는 부분은 오염물질이 유입될 가능성이 있으므로 주의를 요한다.

5. 제주도 지하수의 오염방지공법 개선방안

5.1. 그라우트재의 주입방법

지하수법 및 제주도 특별법 상에는 트레미 파이프 및 그라우트 파이프를 이용한 상향식 주입공법을 규정하고 있다. 그러나 이 같은 상향식 방법은 현장에서 잘 지켜지지 않는 경우도 있을 수 있으므로 이를 엄격히 지켜지도록 하여야 한다. 상향식 주입방법에 의한 그라우팅은 그라우트재를 지표에서 투하하여 하부에서 상부로 over flow 시키므로 시멘트 혼합물의 혼합비에 따라 수밀성이 크게 차이가 나게 된다. 특히 수위하에서의 그라우팅이 이루어질 때 시멘트혼합물의 분리현상과 슬라임 및 낙석으로 인한 공동이 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위해 적의한 급결재를 선정한다. 급결재는 양

생기간동안 일정한 강도를 유지하여 그라우팅의 기능을 충분히 가지도록 몰탈 주입량에 따른 mortar 배합 생산량이 정확히 조절하여야 한다.

5.2. 그라우트 주입재료의 선정

투수계수에 따른 주입재료상의 문제점을 개선하기 위하여 현장에서 측정된 자료를 분석하였다. 조립실트에 해당되는 충적층의 평균 투수계수는 4×10^{-5} cm/sec 정도이나 지층 구조가 상이하고 균열을 포함하는 제주도 현무암 지대의 투수계수를 파악하기 위하여 제주도내 일부 지점에서 투수시험이 실시되었다. Fig. 6에서 나타낸바와 같이 packer를 이용한 주수시험을 실시하였고, 심도 10 m 내외에서 실시된 시험구간에 지하수위는 존재하지 않고

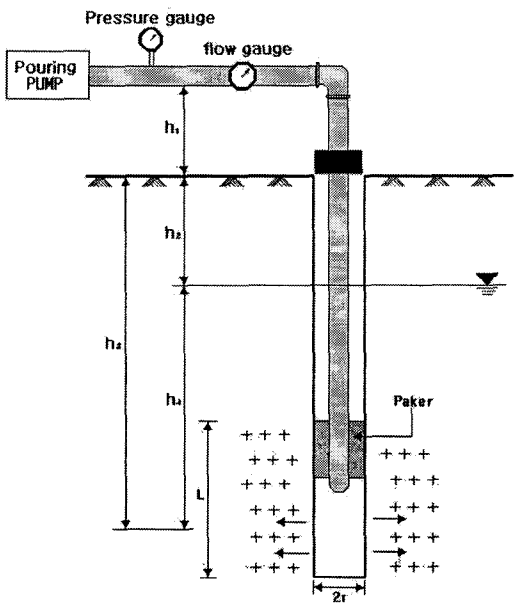

Fig. 6. Schematic presentation of a permeability test.

있다. 수회에 걸쳐 시험을 반복한 결과, 대부분 시험시 주수하자마자 곧 누수되어 무압상태로 주입된다.

투수계수는 주수시험을 통해 산정된 것이며 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 이 같은 결과는 한정된 자료로서 제주도 전역을 대표할 수는 없으나 개략적인 검토용으로 이용이 가능하다. 투수계수가 높게 나타나는 제주도 신생화산 지층구조에서의 그라우팅은 육지부보다 배합되는 물의 양을 줄여 물:시멘트 중량비 = 1:4까지 적용할 수 있으며, 응결제를 이용하여 지하수공에서 멀리 떨어진 곳까지 쉽게 침투되는 것을 차단시켜 필요한 대상구간만을 효율적으로 그라우팅 하는 방법이 적절하다.

5.3. 공동구간 및 공극에 따른 주입재료의 선정

관정내의 공동구간을 차단하기 위한 효과적인 주입재의 선정은 매우 중요하다. 제주도내에서 실제로 개발·이용되고 있는 지하수공 중에 그라우팅 시 공동구간의 유무와 분포에 따라 주입량은 큰 차이를 나타내고 있다(Table 4). 표선3수원의 1호공, 2호공, 3호공에서 굴착경 및 정호경(내부케이싱) 구경이 동일하고 그라우팅 심도가 비슷하다. 즉, 그라우팅 대상체적은 유사하나 실질적으로 그라우팅 시 주입된 모르터량은 큰 차이를 보인다. 이는 3호공의 경우 균열 및 절리가 매우 발달된 부분이 있어 이 구간에서 주입재가 주변공간으로 유실됨에 따른 것이다. 이 관정의 시공 시 3호공의 경우는 공동구간을 차단시키기 위하여 시멘트와 혼합되는 물의 양을 줄이고 시멘트보다 입도가 큰 골재를 혼합하여 그라우팅을 실시하였다.

만약 이러한 대안 없이 규정상의 모르터만을 주입했다면 공동구간으로 유실된 주입재가 하부로 이동되어 이용대상이 되는 대수층을 차단시키는 문제가 발생 할 수 있다. 따라서, 제주도 지하수의 그라우팅은 응결 및 경화, 차수에 최적인 규정상의 재료

Table 3. Computational results of permeability coefficient in the basalt layer of Jeju Island

Station	Examination method	Permeability coefficient (㎝/sec)
Gosan-ri (Hankyung-myun)	Field permeability test	$>4\times10^{-2}$
Seagdal-dong (Seogwipo-si)	Field permeability test	$>2\times10^{-1}$
Seongup-ri (Pyoseon-myun)	Indoor permeability test	$>1.4\times10^{-3}$

Table 4. Construction condition of grouting in No. 3 stream source of Pyoseon

Station	Excavation diameter (mm)	Diameter (mm)	Ggrouting depth (m)	Injection quantity (m^3)
Pyoseon 3-source No.1	450	300	65.9	8
Pyoseon 3-source No.2	450	300	66.1	7
Pyoseon 3-source No.3	450	300	68.7	21

(차수용시멘트; 체적상으로 3%의 벤토나이트를 함유한 시멘트, 물과 시멘트 혼합물의 중량비 = 1:2)를 사용하는 것도 중요하지만, 사전에 굴착공의 상태를 파악하여 오염을 방지하기 위한 목적을 달성하며 하부 대수층으로의 그라우트재 유출을 차단시킬 수 있는 유동적인 그라우팅 공법을 적용할 필요성이 있다.

제주도 지질의 특성상 균열 및 절리가 발달되고, 연 · 경이 교호(交互)될 뿐만 아니라 화산쇄설층 등의 미고결층 및 암반층이 교호되어 있어 지하심부로 굴착할 경우 공이 휠 가능성이 많다. 이에 따라, 굴착 후 내부 케이싱을 설치할 경우 케이싱이 hole 중심에 설치되지 못하고 한쪽으로는 공벽에 닿게 되는 현상이 발생되는 것이다. 이럴 경우, 그라우팅을 실시하더라도 일정한 두께를 유지하기 어려우며, 케이싱과 공벽이 닿는 부분은 오염물질이 유입될 가능성이 있다.

이 같은 문제점을 방지하기 위해서는 1차적으로 내부 케이싱 설치 시 공 중심에 설치되기 위한 centralizer를 케이싱에 부착시켜야 하고, 2차적으로는 그라우팅 두께를 두껍게 해야 한다. 이에 따라, 2000년 개정된 제주도특별법 지하수개발 · 이용시설 등의 기준에 의하면 그라우팅 두께를 채움그라우팅의 경우 7 ㎝ 이상, 주변공간 그라우팅 구간은 5 ㎝ 이상으로 규정하고 있다. 또한, 공벽과 케이싱 사이 외에 지표 및 지층 중간 균열부를 통해 오염물질이 유입되는 것을 방지하기 위하여 채움그라우팅을 실시 하도록 하고 있는데, 이는 그라우팅 두께를 확보하기 위한 것보다는 그라우트재의 압력에 의해 주변으로 수평적 침투를 용이하게 하기 위한 것이므로 반드시 상부구간을 굴착하여 채움그라우팅을 실시한 후 재 천공하는 시공순서를 지켜야 한다. 이렇게 채움그라우팅 구간에서 그라우트재의 압력으로 주변 침투가 잘 이뤄졌을 경우 공극이 발생하더라도 그라우팅 두께가 얇아진 것에 따른 오염물질의 유입 가능성은 희박할 것으로 보인다.

6. 결 론

수차례의 화산분출에 의해 형성된 제주도의 지층 분포는 오염에 취약한 투수성지질구조가 많이 분포하고 있다. 또한, 지하수개발 · 이용을 위해 굴착된 지하 심부에서는 암층 경계면의 클린커 구조, 균열 및 절리, 용암터널 등 오염경로의 역할을 하는 구조들이 다수 형성되어 있다. 이러한 지질구조로 인해 지표상부 또는 굴착공벽과 케이싱 사이에 오염방지 그라우팅 시설이 절실히 요구되는 것은 물론이며, 투수성이 매우 양호한 지질구조 및 균열 · 절리 구간을 통해 파쇄된 부분의 그라우팅은 시공상 많은 어려움이 따르고 있다.

그라우팅 대상구간 하단부까지 주입파이프를 삽입하여 파이프 내로 그라우트재를 주입시켜 하부에서부터 반드시 상향식으로 압력이 주입되게 해야 한다. 이 공법은 기존에 도 제시되어 적용되고는 있지만 실제 현장에서 적용되고 있는지에 대한 의문은 남아 있다. 특히 제주도는 균열 · 절리 구간 및 스코리아층, 클린커층 등의 파쇄대 구간에서 낙석될 가능성이 많으므로 상부에서 투하시키는 채움공법은 피하고 상향식공법의 적용이 절실히 요구된다.

지하심부에도 공동구간 및 대규모 균열 · 절리구간을 포함하고 있어 투수계수가 크게 나타난다. 이들 구간에 주입량을 과대하게 주입할 경우 주변으로 침투 된 그라우트재가 하부의 대수층을 차단시키는 결과를 초래할 우려가 있다. 따라서 관정 상태에 따라 지하수법상에 제시되고 있는 물:시멘트의 중량비가 1:2 보다는 물의 양을 줄이고 그라우재의 입도가 큰 것을 혼합시켜 그라우팅을 실시하는 것이 보다 효과적이다.

균열 및 절리가 발달하고, 연 · 경이 교호될 뿐만 아니라 화산쇄설층 등의 미고결층 및 암반층이 교호되는 제주도 지질의 특성상 지하심부로 굴착할 경우 공극현상이 생길 가능성이 크며, 이에 따라 공내에 설치된 케이싱이 치우쳐 공벽에 닿게 되는 현상이 발생하여 그라우팅을 실시하더라도 일정두께를 유지하기 어렵다. 따라서 그라우팅 시공 시 1차적으로는 내부 케이싱의 설치가 시공 중심에 위치하기 위해 centralizer를 케이싱에 부착시켜야 하고, 2차적으로는 그라우팅 두께를 두껍게 해야 한다. 그라우팅의 깊이는 개발관정의 심도와 지질 특성 및 주변의 환경을 고려하여 기준보다 상향된 깊이에서 적의하게 조절하여야만 한다. 주입재의 과다투입 및 필요이상 구간의 그라우팅 방지, 또한 공동구간의 차단을 용이하게 하기 위해 주입재의 유동성 있는 선정이 필요하며, 이를 위해서는 무엇보다도 공벽상태를 면밀히 확인해야 한다. 제주도 지역의 관정은 공동구간이 형성되거나 붕괴되기 쉬운 지질구조로 인해 그라우팅 시공 시에는 필수적으로 CCTV 검층을 실시하고 이를 통해 굴착공의 상태를 정확히 확인하여야 한다. 또한, 지하수의 그라우팅 시공은 오염물질의 유입을 완전히 차단시키고 이용대상이 되는 대수층 구간을 최대한 보호하도록 실시되어야 한다.

제주도 지하수의 오염방지공법은 굴착공 상태에 따라 주입재의 선정 및 주입방법에서 어느 정도 유동적인 요소가 있을 수 있다. 그러나 지하수의 오염

을 보다 완벽하게 차단시키기 위해서는 보다 많은 개발현장에서 다양한 개발심도에 따른 그라우팅의 적정한 깊이와 두께, 시공 기기와 방법 그리고 시공 전후의 수질현황과 주변관정들과의 비교 등을 통해 보다 효과적인 기술방안이 검토되어야 한다.

감사의 글

이 연구는 제주지역환경기술개발센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1) 농어촌진흥공사, 1994, 토목지질실무지침서, 293pp.
2) 농어촌진흥공사, 1997, 직무교육교재, 412pp.
3) 변창구, 양성기, 1999, 제주도 수자원의 효율적인 이용방안 연구, 제주대학교 해양연구소 논문집, 23, 161-163.
4) 제동홍산(주), 1996, 지하수환경영향조사보고서, 756pp.
5) 건설교통부, 1999, 지하수 업무수행 지침서, 240-245pp.
6) 토목공법연구회, 1996, 지반개량공법(조사·설계·시공), 창우출판, 257-258pp.
7) 과학기술, 1995, 지하수 개발과 환경대책 총기술, 820-858pp.
8) 일본 연약지반 대책 기술위원회, 1995, 토목건축 시공자를 위한 실용연약지반대책공법 총기술, 동화출판, 809pp.
9) 토목공법연구회, 1995, 연약지반대책공법(조사·설계·시공), 창우출판, 243-244pp.
10) 건설교통부, 1999, 지하수법령집, 133pp.
11) 제주도, 2000, 제주도 지하수 보전·관리계획 보고서, 588pp.
12) 제주도, 2002, 제주도국제자유도시특별법, 560pp.
13) 송시태, 고기원, 윤선, 1996, 제주도 지하수의 함양과 오염에 미치는 숨골구조와 곶자왈 지대에 관한 연구, 대한지하수환경학회, 학술발표회논문집, 68-69.