

터널 굴착시 유출 지하수에 의한 환경 영향 분석 및 개선방안

이정호* · 김훈미**

Study on Environmental Impact and Mitigation Plan for
Groundwater Outflow during Tunnel Excavation

Jeongho Lee · Hun-mi Kim

국문요약 ■

ABSTRACT ■

I. 서 론 ■

II. 터널 지하수 유출 관련 환경분쟁 사례 분석 ■

III. 터널 공사 현장의 지하수 변동 분석 ■

IV. 터널 지하수 영향 저감 및 개선방안 ■

V. 결론 및 제언 ■

참고문헌 ■

* 한국환경정책·평가연구원 책임연구원 (Associate research fellow, Korea Environment Institute)

** 한국환경정책·평가연구원 연구원 (Researcher, Korea Environment Institute, hmkim@kei.re.kr, 교신저자)

국문 요약

최근 도로 및 철도건설사업에서는 건설 공사시 질토 등으로 인한 자연환경의 파괴를 최소화하기 위한 친환경적인 시도가 증가하고 있는 추세이다. 그러나 여전히 대형 도로 및 철도건설사업에서 생긴 터널 굴착시 지하수 유출 영향에 대해서는 과학적 검증보다는 피상적인 경험으로 대처함으로 사회적 문제를 일으키고 있다. 따라서 본 연구에서는 도로 및 철도건설사업에서 터널 굴착으로 인한 지하수 영향을 체계적으로 정리·분석하여 터널 공사가 포함되어 있는 사업에 있어서 환경영향평가지 적절한 영향예측, 평가 및 저감방안 수립이 가능한 지침을 마련하는 데 목적을 두고 있다.

■ 주제어 ■ 터널 굴착시 지하수 유출 영향, 환경영향평가, 영향예측, 저감방안

Abstract

It has been attempted to minimize the environmental impacts due to railroad and road constructions. But assessments of the impact for the unwanted discharges by tunneling are still poorly systematic due to lack of scientific evaluation results ; thus, the tunneling projects frequently cause wide social conflicts. The goal of this study is to provide a guideline for appropriate environmental impact forecasts, assessments, and mitigation planning of tunneling projects.

■ Keywords ■ Tunnel groundwater outflow, EIA, impact forecast, mitigation plan

I 서론

최근 도로 및 철도건설사업은 물동량 수송 시간의 단축 및 운행 속도 증가를 목적으로 노선 자체를 가급적 직선화하는 방향으로 이루어지고 있으며, 절토 등으로 인한 자연환경의 파괴를 최소화 할 수 있는 터널 또는 교량 등의 구조물을 건설하는 시도가 증가하고 있다(건설교통부, 2002 ; 환경부, 2003b). 그러나 터널 굴착에 따른 지하수 유출에 대한 과학적인 평가체계가 부족하여, 최근 법정 소송 및 국책 사업의 지연 야기 등 많은 사회적 문제점을 일으키고 있다.

이에, 암반 터널 굴착이 계획된 건설사업에서의 지하수 영향평가에 대한 전반적인 개선 방안 수립의 필요성이 제기되고 있다. 본 연구의 목표는 터널 굴착으로 인한 지하수 환경영향을 체계적으로 정리·분석·규명하고, 이를 바탕으로 적절한 환경영향평가지침을 만들어 터널 공사가 포함되어 있는 사업의 환경영향평가지 적절한 영향예측, 평가 및 저감방안 수립에 실용화하도록 하는 데 있다.

이를 위해 본 연구에서는 그동안 도로 및 철도건설사업 시 터널 굴착으로 환경적 분쟁의 대상이 되었던 사례 중 전문적인 지하수 영향평가가 수행된 4개의 사업에 대해 분석하였다.

II 터널 지하수 유출 관련 환경분쟁 사례 분석

사례연구는 상촌터널, 원효터널, 사패산 터널, 강남순환도로건설사업을 대상으로 수행하였으며, 이들 사업 당시 발생한 환경 분쟁의 원인과 과정 그리고 이를 통해 얻을 수 있었던 시사점에 대해 간단히 알아보았다.

1. 환경분쟁의 원인

각 사례에 대한 환경 분쟁의 원인에 대해 간단히 살펴보면, 먼저 경부 고속철도 제 8-1공구 구간 중 하나인 상촌터널은 공사 착공 후 2년이 경과된 1998년부터 주변 관기리 지역에서 발생한 미식담과 벼의 생육부진을 불러일으킨 물 부족 현상에 대한 민원이 발생하였고

주민들은 물 부족 원인을 터널공사로 인한 지하수 고갈이라 생각하여 이에 대한 보상을 요구하면서 분쟁이 시작되었다(철도청, 2000).

원효터널은 경상남도 양산시 천성산 외곽 지역에 양산단층과 평행한 방향으로 경부고속철도 울산~부산 구간 중 13-3공구 및 13-4공구에 해당되는 지역으로 사지산도립공원을 관통하는 정족산-천성산-원효산 능선을 따라 설계되었다. 지역 주민 및 환경단체는 터널 설치로 인해 능선부 주변에 산재하는 산지습원과 습지생태계가 많은 영향을 받을 것이라고 주장하면서 사업 중단을 요구하게 되었다(넥스지오, 2000 ; 철도청, 2003 ; 현대건설주식회사, 2003).

사패산터널은 벽제에서 퇴계원 사이를 잇는 서울외곽순환도로 구간에 굴착되는 5개의 터널 중 하나로, 지역주민과 환경단체는 터널 건설에 의한 사패산 일원의 지표수 및 지하수 고갈 가능성에 대한 문제를 제기하였다(한국도로공사, 1998). 또한 사패산 터널 부근 화룡사는 민족문화의 유산으로 역사적 의의를 가진 전통사찰로서 많은 승려들의 수행도량으로 이용하고 있으나, 사패산 터널공사로 인한 수행도량으로서의 기능이 상당부분 상실될 우려도 제기되었다.

강남순환도로는 원래 올림픽대로와 남부순환도로의 교통 수요를 분담하여 강남 일대의 교통소통을 원활히 하겠다는 목적으로 계획한 것이다(서울특별시, 2001 ; 서울특별시 건설안전관리본부, 2001). 그러나 도로 노선계획이 바뀌어 남쪽으로 광명시까지 V자형으로 꺾어져 내려오면서 14km나 우회하게 되었다. 따라서 당초 계획한 공사의 목적이 다소 바뀐 실정이다. 이에 교통영향평가서에서도 수도권외곽의 교통수요를 유발시켜 남부순환도로의 체중완화라는 사업 목적과 어긋난다는 결론을 제시하고 있다. 강남도로건설 반대 공동대책위원회와 주민들은 터널의 안정성에 관해서도 신뢰하지 못하고 있을 뿐만 아니라 관악산, 우면산의 생태계 파괴, 터널입구와 환기통 주변의 대기오염 문제 등을 함께 제기하면서 원래의 목적을 상실한 본 공사에 대한 사업 타당성 재검토를 요구하고 있다.

2. 사례분석을 통해 도출한 시사점

본 연구에서는 이러한 분쟁원인을 안고 있는 상기 4개소의 분쟁이 어떻게 진행되었는지를 살펴보고 이를 통해 시사점을 도출하기 위해 그 진행과정을 다음 <표1>과 같이 간단히 정리해보았다.

표1 4개소 터널의 환경분쟁 진행과정

	상촌터널	원효터널	사패산터널	강남순환도로
민원 제기	현지 주민	현지 종교단체 및 환경단체	현지 종교단체 및 환경단체	현지 주민 및 환경단체
주요 환경적 이슈	농업용 지하수 고갈	고산습지 파괴	생태계 영향 및 종교 활동 방해	교통량 폭증으로 인한 주변환경 악화 및 지하수위 하강
요구 사항	경제적 보상	사업 중단	우회노선 요구	사업 타당성 재검토
법정 소송 여부	×	○	○	×
민원 해결 상태	지하수 회복기간 동안 피해 보상 약속	공사착공금지 가처분 기각(2006년 6월 대법원 판결) 공사 재개	양측간 합의 후 공사 재개	EIA 협의 완료
EIA 수행 여부	○	○	○	○
EIA 협의 년도	1993	1994	2001	2004
EIA시 지하수 영향평가 수행 여부	×	×	×	○
지하수 영향평가 수행 년도 및 기간	1999(6개월)	2002(18개월)	2001(3개월)	2001(6개월)

EIA (Environmental Impact Assessment) : 환경영향평가

위의 표에서 나타난 각 분쟁 사례 진행 과정을 분석한 결과 다음의 시사점을 도출할 수 있었다.

첫째, 터널 굴착에 따른 지하수 유출이 직접적인 환경 분쟁의 원인이 되었던 상촌터널과 환경영향평가 단계에서 터널 지하수 유출 영향이 과정별로 수행된 강남순환고속도로의 경우는 진행 과정 중 이해 당사자간의 큰 갈등 없이 분쟁이 종료되었으나, 사패산터널은 지하수 유출에 따른 국립공원 생태계 영향 및 종교 활동 방해라는 문제에 대하여 사업시행 주체와 관련 종교계 간의 소모적인 논쟁을 지속, 실제 공사가 2년 넘게 지연되는 결과를 초래하였다. 원효터널 역시 유사한 상황에 있으며, 분쟁 해결에 어려움이 존재한다. 이러한 분석 결과로 볼 때, 터널 굴착에 따른 환경분쟁 발생시 이해당사자 간의 조정 실패로 인해 일단 문제가 사회적 이슈로 대두되면, 추후에 문제 해결을 위해 추가적인 과학적 정밀조사나 검증이 이루어져 신뢰성 높은 결과가 나온다 하더라도 이해 당사자의 주장을 반복시키기란 어렵다는 것을 알 수 있었다.

둘째, 지하수 영향평가의 수행 시기에 따라 분쟁 타결 결과가 극명하게 구분되는 것을 알 수 있었다. 사패산터널 및 원효터널의 경우, 환경영향평가 협의 후 공사 착공 전 사이의 기간 중에 터널 지하수 유출에 대한 환경적 갈등이 발생, 환경영향평가 중 이를 여과할 수

있는 기회뿐만 아니라, 터널 굴착 후 관찰될 수 있는 지하수 영향 모니터링 결과에 대한 신뢰성을 확인할 수 있는 기회를 상실하였다. 반면에, 상촌터널의 주민 민원은 환경영향평가 종료 후 터널 굴착이 완료된 이후에 발생하였기 때문에, 터널 굴착 후 지하수 유출이 주변 지하수원 저하의 직접적 원인이라는 결론을 용이하게 유도할 수 있었고, 강남순환고속도로는 환경영향평가 진행 중 3차례의 보완과정에서 계획노선 내 터널 굴착시 지하수 유출에 관한 각종 영향에 따른 저감방안 수립 이행에 대해 합의 함으로써, 이에 따른 환경분쟁의 소지를 줄였다는 점에 주목할 필요가 있다.

3. 지하수 영향평가 조사 항목 및 사후관리 측면의 문제점

본 연구에서는 이러한 진행과정상의 문제점 외에도 상기 4개소 사례가 가지고 있는 문제점에 조금 더 구체적으로 접근하고자 본 사례들에서 수행된 터널 지하수 영향평가 조사 항목과 체계에 대한 분석과 사후관리 측면에 대해 조사해 보았다.

먼저, 상기 4개소 터널 지하수 영향평가지 수행된 각종 조사 항목들은 <표2>와 같이 4단계 11개 분야 28개 세부 항목으로 분류가 가능하다.

표2 지하수 영향조사 항목

지하수 영향조사 과정		세 부 항 목	상촌터널	원효터널	사패산터널	강남순환도로
자료수집 단 계	문헌 조사	광역지질	○	○	○	○
		지질구조	○	○	○	○
		수문자료	○	○	○	○
		수리상수		○	○	
	야외지질 조사	과업구간 상세지질	○	○	○	○
		열극 분포	○	○	○	○
		정전현황	○	○	○	○
		지하관정 분포	○	○	○	○
	현장 시험	시험공 시추	○			○
		물리검층	○			○
		지구물리탐사	○	○	○	○
		수리시험	○			○
		추적자시험	○			
	영상자료 분석	항공사진 선구조 분석		○	○	○
		위성영상 지형 분석		○		

표2 지하수 영향조사 항목(계속)

지하수 영향조사 과정		세 부 항 목	상존터널	원효터널	사패산터널	강남순환도로
자료 해석 및 정성해석 단계	수리시험 분석	대수층 수리상수	○			○
		지하수위 변화	○			○
	물리탐사 자료 분석	지하수 분포	○	○	○	○
		풍화대 분포	○	○	○	○
		파쇄대 연장성	○	○	○	○
	지하수 수질분석	용존이온함량	○	○	○	○
통원소함량				○		
지하수 유동 전산해석 단계	연속체 모델링	MODFLOW	○	○	○	○
		SEEP/W				
		기타		○	○	○
	불연속체 모델링	MAFIC		○		
대책 제시 단계	해결 방안		-터널 관련 관정 선정 -수위회복률 및 기간 설정 -피해보상액 산정	-습지보호 구역 일대 지하수위 모니터링	-상부 지하수원 보호를 위한 적정 공법 제시	-터널 유출수의 활용 등
	사후 관리		○	×	×	○

이와 같은 조사 체계는 지하수 영향조사의 일반적 조사 과정으로서, 세부 조사 항목들은 관련 학계 및 산업계 전문가로부터 오래전에 이미 과학적인 검증은 거친 것들이므로, 터널 지하수 관련 환경 분쟁 시에도 적절히 적용될 수 있다고 본다. 그러나 이러한 조사 체계에도 몇 가지 문제점은 존재하며 본 연구에서는 이를 크게 세 가지로 나누어 정리하고자 한다.

첫째, 지하수의 유동 및 유출 메커니즘은 지형 변화나 약취 영향처럼 감각적으로 인지할 수 없는 현상이기 때문에, 세부 조사 항목에서 취득한 분석 자료와 그에 의한 해석 결과에 전적으로 의존할 수밖에 없는 특징을 갖고 있다. 따라서 각 세부 조사 항목들의 수행 결과가 유기적으로 연결되어 있지 않거나, 중요 조사 항목이 누락될 경우, 지하수 영향조사 전체에 대한 신뢰성을 저하시킬 위험이 있다. 일례로, 사업자-환경단체간 갈등이 심했던 원효터널이나 사패산터널의 경우, 해당 터널 구간의 직상부가 국립공원 또는 환경부 지정 보호구역이었던 관계로, 지하수 영향조사의 주요 조사 항목인 시험공 시추 및 수리시험, 지하수위 관측 등을 실시하는 것이 원천적으로 불가능하였다. 상기 두 터널 사례에서 시추 미실시

는 전반적인 지하수 영향조사의 질적 수준이 매우 높았음에도 불구하고, 이해당사자 한쪽 측에서 부실 조사 및 조사 결과의 신뢰성 저하라는 평가를 얻을 수밖에 없었다.

둘째, 상기의 지하수 영향조사 세부 항목은 야외 현장 조사 및 시험, 결과분석, 전산모델링의 3가지가 가장 중요한 조사 단계를 구성하고 있음을 알 수 있다. 문제는 지질학 및 수리지질학 관련 야외조사 및 시험의 진행 특성상 전반적인 소요 시간이 비교적 오래 걸린다는 데 있다.

셋째, 지하수법 조문 및 시행령(건설교통부 지하수법령집, 2005) 상에 명시된 지하수 영향조사 항목·조사방법은 “용수로서 지하수를 개발하고자 할 때 지하수위의 변화”가 발생할 경우에 한하여 수행하는 것으로 규정하고 있으며, 전반적인 조사 절차는 현장 수리시험 및 영향범위 산출에 중심을 두고 있다. 또한, 터널 지하수 유출에 관한 내용은 해당 법령 및 시행규칙에 선언적으로만 명시되어 있을 뿐, 구체적인 지침은 마련되어 있지 않다. 따라서 상기와 같은 터널 지하수 관련 환경 분쟁 발생시 지하수 영향조사 결과에 대한 법적인 근거는 실제적으로 미약한 편이라 할 수 있다.

다음으로 사후 관리 측면을 살펴보면, 도로 및 철도 건설사업에서 터널 굴착은 자연환경을 비교적 덜 훼손하는 것으로 알려져 있어서 그 동안 신규노선 및 노선 선형개량시 터널화를 유도한 경우가 많았다. 또한, 터널로 인한 지하수 영향에 대한 논란이 본격적으로 대두된 것이 불과 최근의 일이므로, 조사대상 협의사업 현장은 그 동안 터널로 인한 지하수 영향 예측이나 사후환경영향조사를 환경영향평가지 요청한 사례가 없었다. 따라서 대부분의 평가서는 터널에 대해서 구체적인 영향의 예측이 없어 단순히 ‘지하수위 저하가 없을 것이며, 그 영향은 미미할 것’으로 평가서에 기재되어 있다. 그러나 터널공사로 인한 자연환경에 대한 영향-지하수위 저하, 식생 변화 등은 아직도 예측이 쉽지 않다. 예측의 정확도를 높이려면 지표지질조사와 시추조사를 실시하여야 하는데, 시추조사에는 비용의 문제와 장비의 진입과 가동으로 위한 훼손과 오염의 문제 등이 수반된다. 비록 시추를 시행하였다고 하여도 지하수위 저하와 차수대책의 적용시 다시 지하수위가 회복되는 정도만을 겨우 예측할 뿐이다.

암반터널 굴착이 계획된 선형사업에서 공사시 및 운영시 제공될 수 있는 지하수 관련 사후환경영향조사 자료는 지하수위 관측치 및 터널 유출량이 있다. 상기 두 항목은 터널 굴착시 지하수 영향을 직접적으로 판단할 수 있을 뿐 아니라, 지하수 유출에 따른 2차적인 환경영향(예: 상부 식생 변화 등)에 대한 근거 자료로 사용할 수 있으므로, 지하수 영향조사의 최종 결론에서 가장 중요하게 제언되는 부분 중 하나로, 최근의 선형사업 관련 환경영향평

가에 있어서도 상기 두 항목의 상시적인 측정을 저감방안으로 요청하고 있는 실정이다(이수재 등, 2004). 그러나 환경 분쟁의 대상이 되었던 4개소의 터널에 대한 환경영향평가나 지하수 정밀 조사시 터널 유출량 모니터링 실시를 제언한 경우는 강남순환고속도로 건설사업 단 한 경우뿐이었으며, 현재 전국에서 진행 중인 터널 공사 현장에서도 유출량에 관한 모니터링을 실시하고 있는 곳이 매우 드물기 때문에, 이에 대한 영향을 일반적인 범주에서 판단할 수 있는 자료 축적이 시급하다고 할 수 있다.

Ⅲ 터널 공사 현장의 지하수 변동 분석

1. 터널 굴착시 지하수 유출량

구조물 건설을 위한 지하공간의 굴착은 주변 지역 지하수계에 스트레스로 작용하여, 때로는 지하수 자원의 고갈과 같은 지하수 장애를 발생시키기도 한다. 또한 터널 내로 유입되는 지하수는 터널 굴착 작업을 어렵고 위험하게 하여 많은 비용이 소요되게 할 뿐 아니라 작업장을 교란시켜 공사에 지장을 초래하기도 한다. 따라서 터널 굴착시 주변지역에서 발생하는 지하수 유동체계의 변화는 터널 설계시 고려되어야 할 중요한 문제로 인식되고 있다.

일반적으로 터널 공사에서 지하수 유출양상을 살펴보면 터널의 굴착과 함께 지하수 유출량이 증가하였다가 점차 줄어드는 양상을 보인다. 이는 차수 및 방수처리 이후 수량의 감소 때문에 일어나는 현상으로, 지하수위 강하와 수위 회복량에 대한 예측이 실시되고 있지 않아서 터널로 인한 지하수 영향의 예측과 실제의 차이에 대한 검증은 할 수 없다. 또한, 터널 유출량 계측은 터널 굴착 후 운영시 발생할 수 있는 2차적인 환경영향을 동시에 모니터링할 수 있다는 장점을 지니기 때문에, 사후환경영향조사에 반드시 수행되어야 하는 아주 중요한 항목이다. 따라서 향후 모든 터널지역은 공사 기간 동안 지하수 유출량을 모니터링하여 국내의 지질별 지하수 변동 특성에 대한 자료를 구축할 필요가 있다.

표3 4개소 분쟁대상 터널의 단위 유출량

	상존터널	원효터널	사패산터널	강남순환
유출량(m ³ /min)	5.62	1.13	0.47	1.46~5.96
산출방법	실제 유출	전산해석	Darcy 법칙	전산해석

2. 터널 시공 현장 수집자료 분석

터널 굴착시 지하수 유출 현상에 대하여, 실제 공사 현장에서의 현황을 파악하기 위해 터널 시공 현장 한 곳을 선정, 현장 답사를 실시하였다. 조사 대상 현장은 서울외곽순환고속도로 일산~퇴계원 구간 중 제 3공구 노고산2터널(L=2,197m) 및 제 4공구 사패산터널(L=3,993m)이다(서울고속도로(주), 2001a,2001b)(한국도로공사, 1998).

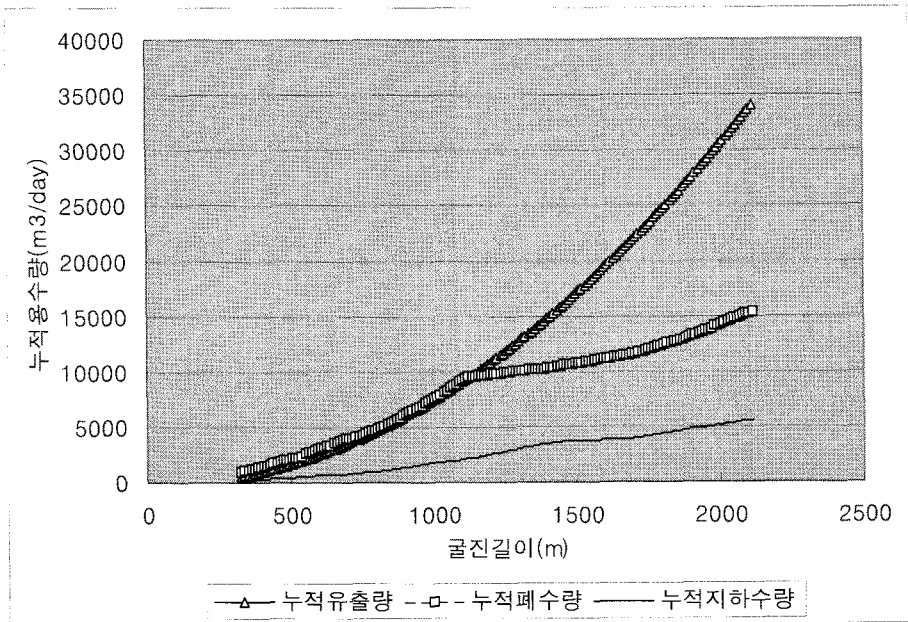
노고산2터널은 이미 굴착, 방수슈트 포설, 콘크리트 라이닝, 유출 지하수 집수관로 매설 등 터널 시공의 기본적인 공사는 완료된 상태이며, 기전, 환기 및 집진시설 설치, 바닥면 포장 등의 부대 공사만이 남은 상태이다. 상기의 터널 역시 지하수 유출에 대한 영향조사를 받았으며, 영향조사시 지하수 단위 유출량은 $1.47\text{m}^3/\text{min}$ 로 산출되어 굴착 완료시 1일 지하수 유출량은 약 $2,119\text{m}^3/\text{day}$ 로 예상되었다. 본 터널은 굴착 공사시 시행된 막장 내부의 지질구조 조사 결과 터널 상부 대수층의 균열 선구조 발달이 미약한 편이어서 터널 굴착시 지하수의 유출이 비교적 적을 것으로 예상되었고, 터널 굴착 완료 후 배수관로에서 배출되는 실제 유출수량 역시 상당히 미약한 것으로 현장 조사 결과 확인되었다. 보통 공사 현장에서 일컫는 '터널 유출수'는 암반 벽면에서 배출되는 지하수 외에 막장 내부 비산먼지 제거 및 작업용으로 사용되는 외부 용수 등을 모두 포함하고 있어서, 순수하게 지하수가 유출되는 양으로 보기는 어렵다. 또한 본 터널 현장에서도 유출량에 대한 상시 측정은 실시하지 않고 있어서, 영향조사시 단위 유출량과의 비교는 불가능하였다.

사패산 터널은 굴착 초기 약 6개월 가량 터널 내 유출수량(외부 작업용수 포함)과 굴착 측면에서의 유출 지하수량을 구분하여 측정한 바가 있어, 관련 측정자료를 이용, 지하수 영향조사시 예측되었던 유출량과 비교하여 보았다. 터널 굴진 길이에 대한 자료를 확보하지 못한 관계로, 현재 총 굴착 완료 길이를 굴착 기간으로 나누어서 1일 평균 11m 정도 굴진한 것으로 예상하였으며, 단위 유출량은 영향조사 보고서에 수록된 $0.117\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 를 사용하였다. 유출량은 이론적 계산값, 총 유출량 및 순수 지하수 유출량으로 구분하여 누적량 형태로 계산하였다<그림1>.

6개월간의 사패산 터널 굴착 공사시 평균 유출 총량 및 지하수 유출량은 각각 $89.7\text{m}^3/\text{day}$, $34.4\text{m}^3/\text{day}$ 로 계산되어 총 유출량 중 지하수가 차지하는 비중이 크지 않음을 알 수 있었다. <그림1>에서 보면, 굴진 초기인 약 300m 길이에서는 이론적 유출량과 순수 지하수 유출량이 매우 유사함을 알 수 있으나, 굴진이 진행될수록 예측량과 실제량간의 차이는 두드러지며, 자료의 최종 일시인 2,112m 굴진 시점시 누적 예측 유출량은

34,000m³/day 정도인 데 비해 순수 지하수 누적량은 예측 유출 총량의 1/7 수준인 5,600m³/day에 불과, 터널 굴착 공사 전 우려되었던 지하수 유출 영향은 사실상 거의 없는 것으로 판단되었다. 현재 굴착공사 중인 막장 내부의 실정을 보더라도, 굴착 측면부는 야외에서 관찰되는 경암 상태와 거의 동일할 만큼 습기가 거의 없으며, 지하수 유출 보다는 오히려 벤치 발파 및 버력 처리용 차량 운행에 따른 대기오염물질축적과 그의 환기 시설 운영이 더 시급한 것으로 관찰되었다.

그림1 사패산 터널 유출수 자료 분석도 (서울고속도로(주),2001a,b)



IV 터널 지하수 영향 저감 및 개선방안

1. 법·제도적 개선방안

1) 터널 지하수 영향평가의 제도적 지침 수립

현행 지하수법 시행령에 규정된 지하수 영향조사 보고서는 통일된 서식 없이 사업자마

다 각각 다른 형태로 작성되고 있으므로 환경 갈등이나 분쟁이 발생하였을 때 논리적 대응이나 비교·분석이 어려웠던 점을 고려할 때 통일된 서식의 마련이 필요하다. 일례로, “환경·교통·재해 등에 관한 영향 평가법(환경부, 2004)”에 제시된 수질영향 평가 체계를 볼 때, 환경영향평가지 수질 항목의 환경적 예측 및 평가를 통일된 작성 지침에 따라 작성되고 있음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 환경영향평가지 지하수 조사 방법을 기초로 하여, 터널 지하수 영향조사시 관련된 각종 조사 방법에 대한 수행 지침을 다음 <표4>와 같이 제안하려 한다. 그러나 이는 어디까지나 제안에 불과하며, 지하수 관련 산·학·연 전문가 및 실제 수행주체인 사업자간의 긴밀한 논의와 보충 연구를 통하여 더욱 훌륭히 보완될 수 있을 것으로 본다.

표4 지하수 영향조사 단계(김태희, 2005)

현 장 조 사	지하수위 모니터링	지하수계의 변화를 정량히 평가하기 위해서는 장기간 (최소 1년 이상)의 모니터링을 통해 지하수위의 변화와 강수와의 관계를 파악함 지형, 심도와의 상관성에 대해 평가할 수 있는 근거가 필요함
	현장 수리시험	터널 대상 심도, 터널 상부, 터널 하부의 각 구간에 대한 수리 시험은 노선을 중심으로 좌우 100m 이내를 기준으로 10km 당 최소 6지점 이상 실시 만일 대규모의 단층대 등의 이상 지역이 존재할 경우 별도의 현장 시험을 요함. 시험의 형식은 양수시험(pumping test)를 기본으로 함 (공간에 대한 상관성 해석이 중요함)
		터널 상단 토양에 대한 침투율 실험을 통한 함양율에 대한 산정
	현장 수질 자료의 취득	시공 후 가능성이 있는 환경오염에 대한 평가근거가 될 수 있는 back data의 수집. 동위원소 분석을 통한 지하수 순환 시스템 해석 근거 제공
	현장 지하수 사용 현황에 대한 조사	주변 지역 지하수공 분포 현황, 기존 자료에 대한 수집 지하수 이용량에 대한 평가
		주변 지하수계에 영향을 줄 수 있는 관련 시설에 대한 파악 (터널, 도수로 터널, 온천, 농업용/공업용/가정용 관정 등) 지하수 오염원의 종류 및 분포 상황 기재 (유류저장시설, 축사, 폐기물 매립지 등)
		하천 유량 조사의 의무화:강수량-시간의 변화에 따른 하천 유량의 변화 터널과 직접 상관 시 최소 5지점 이상에 대한 모니터링 실시
	주변 지역 하천 조사	하천 주변 지하수 모니터링 공 설치 의무화
	현장 조사 자료	현장 물리탐사, 시추정 로깅 자료 (불연속면 상세 맵핑, 지질학적 암상의 변화, 공학적 암반 분류 등) 등 현장 조사 자료는 별첨

표4 지하수 영향조사 단계(김태희, 2005) (계속)

전 산 해 석	지하수 유동 모델링	터널 시공전 (보정 용), 터널 시공 중 (공법에 대한 반영), 터널 시공 후 (중장기 영향 분석)에 대한 부정류 흐름에 대한 모델링
	모델 Grid 설정	현장 모니터링 자료 (지하수위, 강수량) 자료의 활용을 통한 공간 자료의 보정
		지형적 특성 반영
		지질학적 암상 변화에 따른 수직 구조 반영
		공학적 암반 분류에 따른 수직 구조 반영
		터널(터널 상단부에서 하단부에 이르는 구간)은 별도의 레이어로 취급함 (최소 2개 이상의 레이어로 구분함 - 반배수 터널의 경우)
		터널(터널 상단부에서 하단부에 이르는 구간)은 별도의 레이어로 취급함 (최소 2개 이상의 레이어로 구분함 - 반배수 터널의 경우)
		수평 분포에서 터널 수직 방향의 grid 간격 : 터널은 단일 터널을 1/4 이하로 설정함 (반배수의 경우)
	수평 분포에서 터널 수직 방향의 grid 간격 : 터널은 단일 터널을 1/2 이하로 설정함 (완전배수 경우)	
	수평 분포에서 터널 수직 방향의 grid 간격 : 터널 주변 지역은 단일 터널 폭의 1/3 이하로 설정함	
시스템 수리 상수	현장 조사 결과에 따른 시험 결과를 수직적으로 최대한 반영함 수리 상수의 적용 근거를 반드시 적시함	
모델링 결과주요 기재사항	입력 자료의 산출 근거에 대한 명기	
	공사 이전 지하수위의 공간적 분포 (모니터링 결과와 비교-검증 결과 첨부)	
	공사 중 지하수위 변화 정도 (공간 분포 - 공법에 따른 터널 경계 조건의 반영)	
	공사 후 지하수위 변동에 관한 시계열적 변화 (최소 50 ~ 200년 - 터널 내구연한 - 장기 모델링)	
터 널 착 단 계	지하수위 모니터링	터널 시공에 따른 지하수계의 영향 평가 지하수위 이상 변화 시, 주변 지역과의 상관성 및 영향 평가 (별도)
	터널 막장에 대한 세부기록	지질 전문가에 의한 터널 내 막장의 암상, 불연속면 분포 등에 관한 세부 기록 및 기록에 대한 보관 (보존 연한 20년, 20년 후 - 전산 DB화 이후 폐기)
		터널 막장 내 지하수 누수 패턴, 누수량, 누수 지점, 과다 누수에 대한 응급처치 현황에 대한 세부 기재 의무화 (보존 연한 20년, 20년 후 - 전산 DB화 이후 폐기)
		공사 시작 단계에서부터 굴착에 따른 측면 유출 지하수의 수량을 매일 측정하여 기록 (작업용수를 포함한 유출수 총량과는 구분하여 측정함)
사 후 관 리 단 계	지하수위 모니터링	터널 시공에 따른 지하수계의 영향 평가 지하수위 이상 변화 시, 주변 지역과의 상관성 및 영향 평가 (별도) 지하수위 모니터링 자료는 DB화 이후 영구 보존
	터널 유출량 모니터링	배수시스템을 통해 배출되는 터널 내 유출수량을 매일 측정
		모니터링 자료는 DB화 이후 영구 보존

2) 터널 지하수 영향평가의 수행 시기

터널 지하수 문제와 밀접한 연관성이 있는 도로 및 철도건설사업에서의 환경영향평가는 노선이 이미 확정된 상태에서 시작하기 때문에, 여러 가지 노선 대안을 놓고 각 대안노선별 환경적 영향을 추정하는 상위 개념의 환경성 평가는 아직 시행되지 못하고 있다. 이는 도로와 철도건설 사업만이 가지고 있는 고유의 특징(선형 개량에 따른 곡률반경 제한과 산지 지역을 다수 통과해야 하는 지형적 특성)때문으로 판단되며, 이렇게 결정된 노선 입지는 환경영향평가 단계에서 좀처럼 변경되지 않는다. 따라서 도로 및 철도사업의 현행 환경성 평가 운용 상황에서는 노선 선정에 따른 지하수 영향을 고려하는 것이 불필요할 수 있으나, 향후 국가 교통망 구축 상위계획 수립시 노선입지 선정 과정에서 필요한 환경성 평가(전략 환경평가) 중 지하수 영향에 대한 평가 기법 연구에 중요한 설정 기준으로 적용될 수 있을 것이다(환경부, 2003a).

노선선정 단계에서의 터널 지하수 영향은 다음과 같은 사항을 고려하는 것이 중요하다.

첫째, 계획노선 내 터널 굴착 예정 총 길이를 먼저 파악하여야 한다. 최근 터널 굴착의 경향이 암반 굴착에 의한 초장대화를 지향함에 따라, 계획노선 내 암반터널 비율이 높아지고 있고, 지하수 영향 역시 심부 암반 내 부존된 지하수에 집중되어 있기 때문에, 노선 전체가 교량 또는 성토로 인한 노반 부설로 계획되었다면, 노선 선정에 따른 지하수 환경적 영향은 환경영향평가지에도 고려하지 않아도 된다.

둘째, 터널 굴착에 따른 지하수 영향이 주변의 자연 및 생활환경에 직·간접적인 영향을 미칠 경우 이에 대한 지하수 영향조사가 실시되어야 한다. 그러므로 단지 터널의 규모(길이)만을 토대로 지하수영향조사 실시의 유무를 결정하는 것은 그 기준을 설정하는데 문제점을 내포하고 있다. 따라서 암반터널 입지시 고려되어야 할 각종 환경적 사안 - 터널 예정 구간에 대한 지하수 부존량 및 함양량, 수계 분포 관정 이용에 의한 지하수 이용 총량, 지하수 오염 유발시설의 분포 현황, 보존 가치가 우수한 지형 및 지질구조 등을 구체적으로 조사하여, 터널 굴착시 지하수 유출 및 오염물질의 이동 경로, 지형 및 지질 변형 가능성을 각 대안노선에 따라 정성적으로 추정할 필요가 있다. 이를 근거로 터널 굴착에 따른 지하수 영향 현장 상세 조사의 필요 유무를 결정할 수 있으며, 노선입지 결정 후 실제 환경영향평가 단계에서 지하수 영향 조사를 실시한다.

셋째, 환경영향평가의 제도적 측면에서 보았을 때, 현재 시행초기에 있는 스코핑제도 등 예비조사 단계에서 지하수법 시행령 상에 명시된 규정을 적용, 터널 주변 500m 이내에 지

하수변동에 따른 심각한 영향을 받을 수 있는 자연환경 및 생활환경 측면의 요소(습지, 저수지, 소하천, 관정 등)가 존재할 경우 지하수영향조사를 실시하도록 규정하는 것이 바람직 하겠다.

2. 환경영향평가지 저감 및 개선방안

본 연구에서는 환경영향평가지 지하수 영향의 저감 및 개선방안에 대해 협의기관과 사업 주체 시각에서 제시해보려고 한다.

1) 협의기관의 시각에서의 저감방안

지하수 영향조사는 경우에 따라 6개월에서 1년 이상의 장기적인 관측이 요구될 수 있으므로 스코핑 등을 통하여 환경영향평가 착수 초기단계에서 구체적인 실행계획이 수립되어야 한다. 다양한 지하지질구조의 불균질성 및 이방성으로 인하여 일반적으로 터널굴착 이전에 지하수 영향을 정확히 예측하는 것은 매우 어려운 일이라는 것을 협의기관도 명심하여야 할 필요가 있으며, 이러한 단점을 보완하기 위하여 일반적으로 관측공을 설치하여 실제 터널굴착시 발생하는 지하수의 유동 및 하강 등을 모니터링하고 그 결과 저감방안 수립이 필요하다고 판단될 때는 관련 사업 평가 시에 이에 대해 요청하고 있는 실정이다.

이러한 경우에는 환경영향평가 협의 단계에서 영향예측을 통한 구체적인 저감방안을 수립하기 어려우므로 사업의 시행이전에 저감방안에 대한 여러 일반적인 사항들을 수립하는 대신 사업 중 발생 가능한 다양한 시나리오 구성을 통한 조건부 협의 또는 이와 관련한 환경영향 조사계획 수립을 통한 환경영향평가가 협의 될 수 있어야 한다. 이와 같은 경우, 환경영향평가 실시 이후 시행할 수 있는 조사 체계 및 저감방안은 다음 <표5>와 같이 제시할 수 있다.

표5 지하수영향 조사체계 및 저감 방안

<p>터널 지역 현황 조사</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 지반상태조사 : 지구물리학적 조사, 지표지질조사 등을 통한 결과 작성. · 터널 상부조사 : 습지, 천연생태와 인공생태, 자연하천 등의 현황정밀조사 · 온천법 및 지하수법 시행령 관련 규정 적용, 터널 굴착 예정 구간에서 이격거리 300~500m 이내에 분포하는 모든 지하수 관정에 대한 이용 현황 및 지하수오염 유발 시설 현황 조사
<p>지하수 영향 예측</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 터널 상부 지역에서 하향시추 가능여부 평가 · 지반의 상태와 지하수 영향을 정확히 예측하기 위한 수평시추 혹은 실험 시추계획의 타당성 검토 · 구간별 지하수위의 저하의 정도, 저하시간, 회복시간 등을 예측 · 터널 예정 구간 지하수 영향조사의 기본 입력자료로 사용가능하도록 시추공 현장시험 등을 통한 사업지구 부지의 수리지질학적 자료를 충분히 획득 · 수치해석적 지하수유동모델링을 통하여 터널굴착 예정 구간 내 지하수 관정의 지하수위 하강량을 정량적으로 예측하고, 그에 따른 구체적 저감방안 수립 · 지하수-암석 상호화학반응으로 인해 산성 지하수가 유출되는 터널 구간에서는, 산성 지하수의 생성 기작 및 이동 시간, 오염 범위 등을 구체적으로 예측하고, 그에 따른 저감방안수립
<p>지하수 영향 저감방안</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 암반유출 지하수는 완전배수를 목표로 설정하고 제반 여건상 불가피할 경우 차수율을 높여 지하수위 회복 조기 달성 방안 마련 · 국내외의 터널의 지형적 분포(산악터널, 하저터널, 평지지하터널, 해저터널 등)에 따른 배수형태 조사비교 · 일률적 완전배수 혹은 부분배수 방식 적용보다 실제 지하수압 예상치를 설정하여 그에 따른 배수방식 선정(기존 공사 구간의 수압 측정 조사 자료를 근거로 하여 설정) · 차수율에 따른 지하수위 회복율과 회복시간 예측 · 터널굴착에 따른 지하수 변동이 짧은 기간이라도 주변에 심각한 영향을 줄 것이라고 판단된 경우, 굴착 이전에 파쇄대 등 지하수 유출 가능성이 있는 부분에 대하여 적절한 대응 공법(예, pilot 터널 굴진 또는 프리그라우팅 등)을 통해 유출가능성 차단 후 터널굴착 시행 · 관련법상 지하수오염유발시설에 해당되는 시설은 공사시 모두 철거 · 영향을 받는 주변 관정에 대해서는 대체 용수원 확보 제공 · 산성 지하수 유출이 우려되는 구간에 대해 유출 지하수를 전량 차집하여 적정 pH로 중화 처리 후 방류
<p>지하수 영향 모니터링 계획</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 지하수 영향 조사 목적을 자연환경의 변화에 중점을 두고 실시 · 공사시 터널 지하수의 유출량을 조사·기록(순수 지하수와 공사 용수를 구분하고 자료를 활용할 수 있도록 상용 스프레드시트 프로그램 등에 입력) · 일별로 터널 굴착실시 여부, 유출량, 일기 변화, 수질 등을 조사·기록 · 주변 지하수, 천연생태 및 인공생태 등의 수위 변화, 지표수량의 변화 등을 조사·기록 · 지하수 영향과 그로 인한 환경영향에 대한 원인 분석 및 대책 기록 · 현재 규정은 도로건설사업시 사업착공시부터 운영개시 후 3년까지 환경영향조사를 하도록 되어 있으나, 지하수 영향은 이보다 더 장기간에 걸쳐서 발생할 수 있으므로 조사기간을 연장하여 계획 수립

자료출처 : 환경부, 1997,1999,2001a,b,c

현행법상 터널 굴착 또는 기타 건설사업으로 인한 지하수 수자원 이용에 영향이 있을 경우, 이의 저감방안에 대한 특별한 환경기준은 아직 설정되지 못한 상황이므로, 터널 굴착과

관련된 지하수 환경의 영향평가는 해당 건설사업 개개의 경우에 따라 적용되는 저감방안 기준이 달라질 수 있는 게 현 실정이다. 차후, 터널 굴착으로 인한 지하수 유출 평가 사례 자료가 축적되고, 그에 대한 집중적인 연구 및 평가에 필요한 모델링 기법이 발전하면, 향후 모든 도로 및 철도사업에 범용으로 적용할 수 있는 평가기준이 설정될 것으로 전망되며, 이에 대한 연구도 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

2) 사업 주체 시각에서의 개선방안

(1) 지하수 영향조사의 수행

노선선정 단계에서 지하수 영향이 존재할 것으로 판단된 건설사업의 사업자는 상기에서 줄곧 언급된 터널 지하수 유출에 대한 영향조사를 주체적으로 다음 단계에 따라 수행할 필요가 있다. 1단계(지하수 영향 요소 분포 조사)→ 2단계(지질 및 지하구조분포 조사)→ 3단계(지하수 유동조사, 지표수 유동조사, 지하수 유동 모델링을 포함한 수리학적 특성조사)→ 4단계(상관성 판단)

1-3 단계에 대해서는 각 단계별 조사항목에 대한 검사목록(체크리스트)을 마련하여 사업의 특성 및 규모, 지형 및 지질, 생태계 현황, 주변 생활환경 등을 고려한 각 단계별 조사 및 분석방법을 선택할 수 있도록 지하수 영향조사 계획을 수립하는 것이 필요하다. 이를 통하여 최적의 영향조사 방법 및 기간을 결정하는데, 조사 실시 시기는 노선 선정이 확정된 이후 환경영향평가서 초안 단계에서 실시하여, 협의기관이 초안 검토시 지하수 영향조사 결과를 검토할 수 있도록 하는 것이 바람직하겠다. 조사 기간은 사업의 규모 및 주변 상황에 따라 달라질 수 있겠으나, 지하수 영향조사에 포함되는 각종 수집 자료의 다양성, 현장 시험 및 모델링 수행 기간 등을 고려하여 볼 때, 최소 6개월 이상이 적절할 것으로 본다.

(2) 터널 내 지하수 유출량 산정 및 예측

터널 내 지하수는 굴착 초기에 집중적으로 유출되거나 장기적으로 유출하는 것으로 구별되며 이러한 유출 상태나 유출 지하수량 및 그 집수범위는 주로 지하수를 보존하는 대수층의 수리지질학적 특성 (예. 수리전도도, 저류계수 등)에 영향을 받는다. 터널 노선이 단층과 교차하는 경우에는 단층 방향으로 영향이 확대되며 터널이 중간에서 지하수 주요 이동경로를 교차하는 경우에는 하루 측으로 물의 보급이 현저히 감소되어 갈수가 하루 측에서 크게 확대되므로, 이러한 부분을 고려 할 수 있는 유출량 측정 방법을 선정하는 것이 바람직하다.

갈수기의 수계는 대부분 유역의 지하수에서 흘러나오고 그 수량은 상시 용수량과 밀접한

관계가 있으므로 이 갈수 유량과 지형에서 예상되는 집수범위로부터 터널의 상시 용수량을 추정한다. 갈수 예상지역의 정천에 대해서는 그 분포, 수량의 계절적 변화, 이용 상황 등을 조사하여 갈수 대책자료로 이용하며, 이 경우 예상 밖의 위치에서 갈수가 생길 수 있으므로 될 수 있으면 광범위하게 조사해두는 것이 좋다. 또한 용수로 인한 막장의 불안정과 이에 대처하는 보조공법 및 특수공법을 검토하여야 한다.

또한 시추 시 공내 지하수위 측정으로 과업구간의 지하수위 분포를 대략 파악할 수 있으나 이수 등의 영향으로 정확한 지하수위 측정이 어려운 경우가 있으므로, 장기적인 지하수 조사를 위해서는 영구 관측 공을 이용함이 바람직하다.

과업 구간의 지질별 특성에 따른 단위 유출량은 자체 연구 또는 유사사례 조사를 통하여 확보한 후, 이를 기초로 하여 터널 유출량 예측을 실시하는 것이 바람직하다.

(3) 터널 지하수 영향 모델링 방법 선정

터널 지하수 영향조사에서 핵심이 되는 유동 모델링에는 전문적인 사용 교육을 이수한 경험자만이 구동할 수 있는 프로그램들이 이용되며, 대부분 고가의 상용 프로그램이기 때문에, 영향조사 단계에서 어떤 전산해석 프로그램을 이용할 것이냐에 대해서는 이를 실시하는 사업주체가 결정할 문제라고 판단된다.

V 결론 및 제언

본 연구의 연구 결과를 종합하여 다음과 같은 네 가지의 결론을 도출할 수 있다.

첫째, 터널 굴착시 지하수 영향평가가 실시되어야 한다.

개발사업 수행시 환경적 사안에 대한 반영 여부 및 그에 대한 욕구는 계속적으로 증가될 것은 자명한 사실이다. 최근에 잇따라 발생한 터널 지하수 관련 범국가적인 환경분쟁 역시 이러한 추세를 반영하고 있다. 결국, 환경영향의 올바른 예측 및 평가에 소요되는 시일이 현재보다 늘어날 것이며, 개발을 담당하는 사업자의 입장에서 볼 때, 개발에 따른 이익만을 최우선적으로 중시하다가 이러한 환경적 욕구에 밀려 개발사업 자체를 실시하지 못하게 될 가능성은 앞으로 충분히 있다. 물론 터널로 인한 지하수 영향이 모든 개발사업에서 다 발현되지는 않을 것으로 본다. 그러나, 대부분의 환경분쟁이 '개연성'이라는 전제에서 시작되는 바, 지하수 영향평가에 대한 치밀하고 과학적인 체계를 구축하고, 그에 따라 평가를

수행한다면, 계획 단계에서 불거진 환경 사안의 해결 시간을 현재보다 대폭 단축할 수 있고, 이는 개발이익의 차원을 뛰어넘는 보다 귀중한 사례 가치가 될 수 있으므로, 향후 터널 굴착이 계획된 철도 및 도로, 기타 산업시설 건설공사에 있어서는 계획 터널의 종류 및 연장에 상관없이 지하수 영향평가를 실시하는 것이 바람직하다 하겠다.

둘째, 터널 지하수 영향평가는 단계별로 실시하는 것이 바람직하다.

터널 굴착에 따른 지하수 영향은 개발사업 전체의 흐름(노선선정→환경영향평가→공사→운영)에서 볼 때 어느 한 단계에서만 집중적으로 시행한다는 것이 결코 바람직하지 않다. 각 단계별로 필수적이거나 중요한 지하수 영향평가 항목이 있으며, 각 항목은 개별 단계에서 수행하는 것이 바람직하다. 그러나 가장 중요한 지하수 영향평가는 아무래도 환경영향평가 단계에서 그 결과가 도출되는 것이 협의권자와 사업자 양자에게 모두 유리할 수 있고, 지하수 영향평가의 특성상 비교적 시일이 오래 소요된다는 점을 감안하여 볼 때, 지하수 영향평가의 세부 조사 항목 수행은 노선 선정이 종료되고 환경영향평가 초안이 제출되기 전 사이의 기간에 시행하는 것이 바람직하겠다.

셋째, 터널 지하수 영향평가에 사용될 단계별 조사 항목 지침서 마련이 필요하다.

환경영향평가의 기본 골격인 ‘조사 → 예측 → 저감 → 사후관리’의 체계를 기준으로 한, 터널 굴착 예정 개발사업의 수행 과정에서 필요시 되는 지하수 영향조사의 세부 항목은 <표6>과 같다.

표6 터널 지하수 영향조사 항목 및 단계별 적용

지하수 영향조사 과정		세 부 항 목	개발사업 수행 단계			
			노선선정	영향평가	공사중	운영시
문헌 조사	· 노선계획 검토	◎				
	· 지형분포	◎				
	· 광역지질	◎				
	· 지질구조	◎	○			
	· 수문자료	○	○			
	· 수리상수	○	○			
	· 지하구조물 분포	◎	○			
야외 지질조사	· 법정 규제지역	◎	○			
	· 과업구간 상세지질		◎			
	· 열극 분포		◎			
	· 정전현황	○	◎			
	· 지하관정 및 천연샘 분포	◎	◎			

표6 터널 지하수 영향조사 항목 및 단계별 적용(계속)

지하수 영향조사 과정		세 부 항 목	개발사업 수행 단계			
			노선선정	영향평가	공사중	운영시
자료수집 단계	현장 시험	· 시험공 시추		◎		
		· 물리검층		◎		
		· 지구물리탐사		○		
		· 수리시험		◎		
		· 추적자시험		△		
	영상자료 분석	· 항공사진 선구조 분석	○			
	· 위성영상 지형 분석	○				
자료 해석 및 정성해석 단계	수리시험 분석	· 대수층 수리상수		◎		
		· 지하수위 변화		◎	○	
	물리탐사 자료분석	· 지하수 분포		○		
		· 풍화대 분포		○		
		· 파쇄대 연장성		○		
	지하수 수질분석	· 용존 이온 함량		△		
· 동위원소 함량			△			
지하수 유동 전산해석 단계	연속체 모델링			· 사업의 특성 및 조사 자료의 성질에 따라 사업자가 스스로 선택함 · 모델링 코드 적용 사유 기록 · 필요시 운영 단계에서도 실시		
	불연속체 모델링					
계측 단계	지질공학적 계측	· 암반응력 및 변형 시험		○		○
		· 파쇄대 상세분포 조사		○	○	
	수리지질학적 계측	· 터널 유출량의 계측 및 자료 축적			◎	◎
		· 지하수위 모니터링 및 유출량과의 상관성 분석			◎	◎
대책 제시 단계	세부 결정 사항		· 지하수 영향평가 실시 여부 결정 · 지하수 영향평가 시기 결정	· 저감방안 및 공사시 및 운영시 사후관리 방안 제시	· 실시실제 반영 여부 파악 · 영향평가 시 예측 결과와의 비교 및 보완	· 유출량 측정 결과 해석 및 2차 환경영향 추정
	결정 사항 이행 여부 검증		◎	◎	◎	◎

(범 레 : ◎ - 필수, ○ - 중요, △ - 선택)

상기의 표에 언급된 조사 항목은 본 연구의 결과를 종합하여 볼 때 도출 가능한 가장 최적의 '안'에 불과하다. 세부 항목별로 누락된 사항이 있을 수 있고, 중요도 면에 있어서도 관련 학계의 종사자 및 사업 담당자와의 시각적 차이는 분명히 있을 수 있다. 따라서 본 단계별 조사 항목표는 본 연구 이후 지하수 영향평가 관련 산·학·연 종사간의 충분히 협의 및 토론을 거친 후 최종적으로 결정하는 것이 바람직하다고 본다.

넷째, 터널 지하수 유출에 따른 저감방안이 마련되어야 한다.

상기에서 언급했다시피, 환경영향평가의 기본 골격은 '조사 → 예측 → 저감 → 사후관리'이다. 이러한 골격에 따라 영향평가를 수행하는 것은 터널 지하수 문제에 있어서도 예외가 아닐 수 없다. 또한, 조사 항목에 의거한 충분한 현장 및 자료 조사 결과와 그에 따른 예측이 과학적으로 충분히 수행되어야만 터널 지하수 유출에 따른 '저감방안'이 도출될 수 있음을 간과해서는 안 된다.

터널 지하수 유출에 따른 환경영향의 저감방안은 '기술적'이라고 표현할 수 있는, 사업 현장에서 즉시 적용 가능한 형태로 도출되는 것이 가장 이상적일 것이다. 물론 터널 굴착 예정 지구의 지역적 특징이나 적용 공법, 그 외의 각종 사회적인 문제 등을 포괄적으로 감안하여 볼 때, 세부적인 기술적 저감방안은 사업마다 조금씩 달라질 수 있다. 따라서, 터널 굴착이라는 대규모의 공사 단계별 발생할 수 있는 환경적 영향과 결부시켜서, 공통적인 사항을 도출하는 것이 일단 일반적인 저감방안이라 할 수 있다.

참고문헌

- 김태희(2005), 장대터널 건설에 따른 지하수 영향평가에 대한 제안
- 건설교통부(2002), 환경친화적인 도로설계기법 연구(1단계)
- 건설교통부(2005), 지하수법령집
- 서울고속도로(주) (2001a), 서울외곽순환(일산-퇴계원)고속도로 북한산국립공원 터널통과에 의한 수리 변동분석 보고서
- 서울고속도로(주)(2001b), 서울외곽순환(일산-퇴계원)고속도로 북한산국립공원 터널통과에 의한 수질 및 수량변화 분석 보고서
- 서울특별시(2001), 강남순환 도시고속도로 건설사업 환경영향평가서
- 서울특별시 건설안전관리본부(2001), 서울특별시 강남순환고속도로 5, 6, 7공구 사전 지하수환경영향 조사 보고서
- 이수재 외 (2004), 도로 건설사업의 환경영향예측과 사후모니터링 비교 분석, 한국환경정책·평가연구원
- 이정호 외 (2005), 터널로 인한 지하수 영향 저감방안 연구, 한국환경정책·평가연구원
- (주)넥스지오(2000), 고속철도 13-3공구 노반 신설 기타 공사
- 철도청(2000), 경부고속철도 8-1공구 상촌터널 주변계곡의 수량감소 원인조사 연구, 한국자원연구소
- 철도청(2003), 경부고속철도 천성산(원효터널)지역 자연변화 정밀조사보고서
- 한국도로공사(1998), 서울외곽순환고속도로(벽제~퇴계원) 건설사업 환경영향평가서
- 현대건설주식회사(2003), 경부고속철도 제 13-4공구 노반신설 기타공사 지반조사보고서
- 환경부(1997), 환경영향평가서 검토편람
- 환경부(1999), 각종 영향평가제도의 통합방안에 관한 연구
- 환경부(2001a), 환경영향평가 관련 규정집(고시·훈령·예규 등)
- 환경부(2001b), 환경영향평가서작성등에관한규정
- 환경부(2001c), 환경영향평가의 객관성 확보를 위한 절차 개선 연구
- 환경부(2003a), 전략환경평가제도 도입에 관한 연구
- 환경부(2003b), 환경친화적 계획기법 및 운용방안 개발에 관한 연구
- 환경부(2004), 환경·교통·재해등에관한영향평가법