

## 터널굴착 공사에 따른 지하수 유출량과 수리지질학적 특성



**이병대**  
한국지질자원연구원  
환경지질연구부 선임연구원  
blee@kigam.re.kr



**조병욱**  
한국지질자원연구원  
환경지질연구부 선임연구원  
cbw@kigam.re.kr



**성익환**  
한국지질자원연구원  
환경지질연구부 책임연구원  
sih@kigam.re.kr

### 1. 서론

대규모 지하구조물 건설시 지하공동으로의 지하수 유출은 단열면의 특성에 달려 있다. 암반내에 발달하는 단열들은 각종 토목 구조물의 건설 및 설계에 있어서 매우 중요한 역할을 하며, 또한 최근 주요 연구대상이 되고 있는 결정질 암반내의 지하수 유동을 지배하는 중요한 요소이다. 지하수 유동을 고려할 경우의 거의 모든 암반 매질은 균질, 등방성이 아니고, 우세한 방향성을 가지는 많은 단열들이 분포되어 있고, 단층 또한 빈번하게 발달되어 있다.

최근 지하철건설, 고속전철공사, 도수로터널 등 대규모 지하공간 개발의 증가에 따른 지하수 유동체계의 변화로 인하여 지하수와 관련된 다양한 문제가 발생되고 있다. 터널 굴착중에 발생하는 지질공학적 문제들중의 하나는 터널내로의 지하수 유출이다. 많은 양의 유출은 터널 굴착을 어렵고 위험하게 하며, 많은 비용이 들게 하고 공정을 지연시킨다. 그러므로 터널 굴착중에 발생하기 쉬운 지하수의 유출량을 산정하고, 지하수가 유출되는 구간의 단열분포 특성을 파악하는 것이 필수적이다.

터널내로의 지하수 유출의 예측에 대한 이론적인 분석

은 Goodman et al.(1965)에 의해 보고되었으며, 터널내로 유출되는 지하수 유출량의 산정에 있어서 좀더 복잡한 수리화학적 조건에 대하여, 특수한 경우의 수치 모델이 마련되어야 한다고 보고하였다.

국내에서 터널 지하수와 관련한 연구로는 이종운 등(1996)의 영천댐 도수로터널 주변지역 지하수에 대한 수리지구화학적 연구와 성익환 등(1998)의 영천댐 도수로터널 주변지역의 지하수유동 연구가 수행되었다. 조병욱 등(1999)은 터널 굴착에 의한 지하수 유출량을 산정하기 위한 방법으로 유속계를 이용하였다. 또한 이병대 등(2000)은 터널 굴착에 따른 주변 지역의 지하수위 변동과 단열구조와의 관련성을 연구하였다.

연구지역은 영천댐 도수로터널 구간으로, 청송군 안덕면과 현서면, 그리고 영천시 자양면 일대이다(Figure 1). 이 지역은 도수로터널 굴착으로 인하여 터널 주변 대수층의 지하수가 터널내로 유입되면서 연구지역내의 지하수위가 급격히 하강하고, 주위의 지하수 수리시스템이 변화되었고, 지표수와 지하수의 고갈 현상이 발생하였다. 이로 인한 대규모 민원이 제기되면서 터널내로 유출되는 지하수 유출량과 유출구간 규명의 필요성이 요구되었다. 본 연구는 도수로터널내의 유출량과 수리지질학적인 특성의

관련성을 규명하기 위한 것으로, 이를 위하여 야외지질조사 및 지질구조조사, 터널내 지질구조조사를 실시하였고, 터널내 유출지점의 단열구조 및 지하수 유출량을 측정하였다.

## 2. 터널개요

영천댐 도수로터널은 경북 안동시 길안면 송사리 터널 입구로부터 청송군 및 포항시 일부지역을 지나 영천시 자양면 충효리의 출구까지 총 32.97km에 달하는 장대터널로 본 터널과 3개의 사갱으로 형성되어 있다. 이 도수로터널 건설사업은 임하댐 및 길안천의 물을 영천댐으로 도수하여 경북 동남부지역에 용수를 공급하고 금호강의 수질을 개선하기 위한 것으로 지표하 100m~800m 깊이에서 굴착되고 있다. 터널의 방향은 남북 방향과 남동 방향으로, 입구쪽의 안동시 길안면 송사리에서 청송군 현서면

백자리 사이의 구간은 남북 방향이고, 백자리에서 출구쪽의 영천시 자양면 충효리 사이의 구간은 남동(N40°W) 방향이다. 이 터널은 자연 유하식 수로 터널로서, 터널 입구의 표고는 183m이고 터널 출구의 표고는 162m로 입구와 출구의 고도차는 21m로서 약 0.06%의 경사를 가지는 아주 완만한 경사의 터널이다. 터널 굴착공법은 약 11km 구간은 재래식 공법인 발파에 의한 굴착공법(NATM)과 22km 구간은 TBM 공법으로 굴착되었다.

## 3. 수리지질 및 단열구조

연구지역은 경상퇴적분지 하양층군의 퇴적암류와 유천층군의 화산암류 및 이를 관입한 불국사 관입암류들이 분포한다(Figure 2).

퇴적암류는 사암과 셰일의 호층이며, 암색은 저색, 녹회색 및 회색으로, 이 층은 접촉변성작용을 받아 대부분이 호온펠스화 되어 있다. 층리는 EW 내지 WNW 방향의 주향에 15°에서 25°의 경사각을 가지며, 완만한 습곡의 익간경사각(Interlimb)이 큰 향사형의 개방습곡을 이루고 있다. 층리발달이 아주 양호하며, 부분적으로 파쇄된 사암층은 이 지역의 주 대수층을 형성하고 있으며, 층리면은 지하수의 주요 통로 역할을 하고 있다.

유천층군의 산성 화산암류는 주로 유문암질 응회암으로 화산력(lapilli)을 함유하는 화산력 응회암이 대부분이다. 불국사 관입암류들의 주된 암석은 화강암류로 입도가 거의 전역에 걸쳐 균등하나 암체의 주변부는 비등립질인 반암으로 산출된다.

연구지역을 지배하는 지질구조는 퇴적암의 층리 변화에 의한 습곡구조와 암반의 취성변형 작용에 의해 변형된 단층 및 절리들이다. 단층구조는 서북서 방향의 좌수향의 주향이동 단층이 지배적이며, 화목리를 중심으로 거의 남북 내지 북북동-남남서 방향의 단층들이 발달하기도 한다. 서북서 방향의 좌수향 주향이동 단층으로는 금천단층

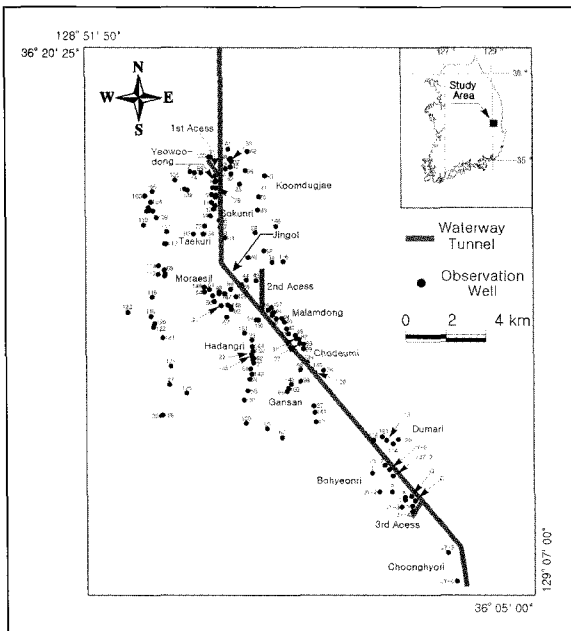


Figure 1. Location of study area and the waterway tunnel.

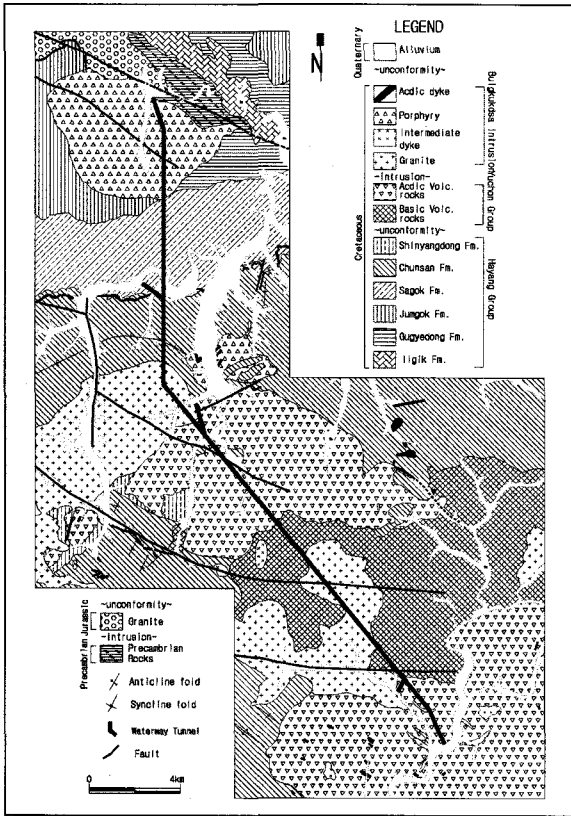


Figure 2. Geologic map of the study area.

과 가음단층이 있다. 연구지역의 단열구조들은 이들 두 단층과 관련되어 동서 혹은 서북서 방향의 단열들이 많이 발달되어 있다. 연구지역내 단열발달은 퇴적암의 층리면, 층리절리, 그리고 화강암류의 평판절리와 같은 저각의 경사를 가지는 부분과 75° 이상의 고각의 경사를 가지는 부분의 두 개의 뚜렷한 단열군으로 형성되어 있다. 퇴적암 지역내에는 층리절리가 가장 많이 발달되어 있으며 평균 주향과 경사는 N70~80° W · 25° SW이다. 화강암의 평판 절리는 N35° W · 12° NE의 배향을 가진다. 고각의 절리들은 퇴적암 지역에서는 N80° W · 85° SW와 N10° E · 85° SE 두 방향의 절리조가 우세하며 이들은 서로 직교하는 신장성의 규칙절리들이 대부분이다. 화산암 및 화강암 지역은 N40~50° E · 85° SE/85° NE, N70° E · 80° SE, 그리고

N70~75° W · 80° SW 방향의 절리조가 우세하게 발달한다.

#### 4. 터널내 단열분포 특성

터널 내부도 지표에서 확인되는 것과 크게 다르지 않은 지질구조적 특성을 보인다. 단층과 절리를 포함하는 단열구조의 발달이 현저하며 암맥류의 관입구조도 뚜렷하게 인지할 수 있다. 이들 단열구조들중에는 단층각력이나 단층점토가 발달되어 있는 것들은 쉽게 단층으로 인식될 수 있으나, 그렇지 못한 경우 절리와 구분이 어려운 경우가 많다.

터널내 단열들의 발달은 연구지역 전구간에 걸쳐 N70~80° W 방향이 우세하게 발달하며 N20° E 방향도 뚜렷한 발생빈도를 보인다. 그러나 N70~80° W 방향의 단열들이 비교적 균일한 발생 분포를 보이고 있는 반면, N20° E 방향의 단열들은 국부적으로 치밀한 간격으로 밀집 발생하는 경향이 있다. 이외에도 N40° ~50° E, N70° E, N60° W 방향의 단열군들도 잘 발달하고 있다. 이러한 여러 단열들중에서 단층의 증거를 명백히 보여주는 것들

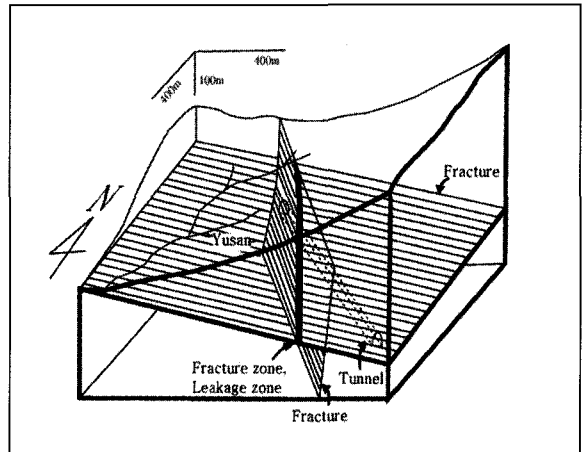


Figure 3. A schematic illustration showing a pattern of the fracture zone in the leakage site at a distance of 26,840m from the entrance of tunnel.

이 몇 개 있다. 대부분이 N70~80°W 방향의 것들이며, 금천단층이 통과하는 입구로부터 16,730m~16,750m 구간에서는 두께 1m 안팎의 단층대를 형성하기도 한다. 또한 입구로부터 26,840m 지점에서는 N60°W 방향의 단층과 N20°E 방향의 저각도 단열의 교차선이 단열대(Fracture zone)를 형성하여 심하게 파쇄되어 있으며, 이를 통하여 다량의 지하수가 유출되었다(Figure 3).

암맥류들은 대부분 안산암질 암맥으로 터널 내부에서 화강암과는 매우 불규칙한 접촉면을 보이나, 일반적으로 N70°W 방향의 단열들과 평행하게 발달하고 있다.

## 5. 터널내 유출량

연구지역의 도수로터널은 입 출구부를 제외한 대부분의 구간이 지표하 100m~800m 깊이에서 굴착되고 있는 산악터널이다. 터널이 굴착되지 않은 자연적인 환경에서는 지하수의 이동속도가 매우 느리다. 그러나 연구지역과 같이 지표하에 터널이 굴착되면 지하에서 상당한 압력에 놓여 있던 지하수가 대기압과 같은 환경에 놓이게 되므로 주로 단열대를 따라서 지하수가 빠른 속도로 터널내로 유출된다. 터널 굴착으로 인한 터널내로의 지하수 유출을 예측하기 위한 가장 효과적인 방법은 지하수 흐름을 지배하는 단층이나 절리와 같은 단열구조들을 규명하는 것이다.

터널 굴착에 따른 연구지역내 지하수체의 거동 특성을 파악하기 위하여 터널 굴착시 그라우팅 이전의 초기 유출량과 초기 그라우팅 이후의 구간별 유출량을 측정하였고 단열구조와 비교, 분석하였다.

### 5.1 그라우팅 이전의 초기 유출

터널 굴착시에는 보통 굴착전 터널 막장부에서의 선진 천공이나 발파를 통하여 많은 양의 지하수가 초기에 유출

된다. 이러한 많은 양의 초기 유출은 주민 민원을 야기하고 시공 공정을 어렵게 하므로 그 양을 정확하게 파악하고 차수 그라우팅 공법을 적용하는 것이 필요하다. Table 1은 터널 입구로부터의 거리에 따른 구간별 지하수의 초기 유출량과 단열발달 상태, 그리고 단열의 특성 및 지질을 정리한 것이다. Figure 4는 초기 유출량이 많았던 구간들을 대상으로 입구로부터 떨어진 거리와 유출량과의 관계를 도시한 그림이다. Figure 4에서 전체 유출량은 총 120,990m<sup>3</sup>/day이며, 초기 유출이 심했던 구간은 크게 6개 구간으로 세분할 수 있다. 첫 번째 구간은 1사갱 북쪽 구간으로 7,355m ~ 7,545m 구간에서 25,182m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었다. 이러한 지하수 유출로 인하여 실제 이 구간에 위치한 관측공인 cs-37, cs-38, cs-39, cs-41의 지하수위는 굴착 초기에 60m 이상 하강하였다(이병대 등, 2000). 두 번째 구간은 1사갱 남쪽 구간중, 10,993m에서 12,588m 구간으로 여우동, 신촌, 소근리 등에 해당되며, 29,070m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었다. 이 구간에 위치하고 있는 cs-7, cs-8, cs-10, cs-13, cs-14, cs-18, cs-78, cs-79, cs-134 등은 대부분 연구기간 초기부터 100m 이상의 수위하강을 보여주고 있다. 특히, 11,330m 구간에 위치한 cs-18은 터널이 통과되지 않은 시점에서의 지하수위는 자분하고 있었다. 그러나 1997년 10월 20

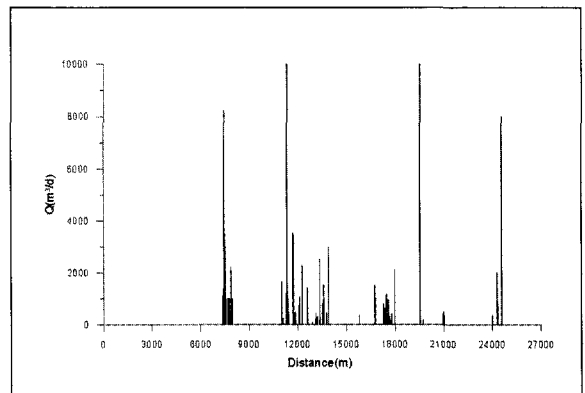


Figure 4. Relation between inflow rates of the first stage and the distance from the entrance of tunnel.

Table 1. Inflow rates of the first stage before grouting of the water way tunnel

Inflow Section(m)	discharge rate(m <sup>3</sup> /d)	Rock type	Fracture orientation	Remark
7355-7375	555	sedimentary	N80W/30SW, N5E/85NW	Fault, Joint
7375-7385	1100	sedimentary	N80W/30SW, N5E/85NW	Fault, Joint
7387-7397	790	sedimentary	N80W/25SW	Bedding joint
7400-7410	1350	sedimentary	N60W/80NE, N5E/85NW	Fault, Joint
7420-7432	1577	sedimentary	N60W/80NE, N5E/85NW	Fault, Joint
7435-7455	8200	sedimentary	N80W/25SW, N10E/85SE	Fault, Joint
7455-7460	2140	sedimentary	N80W/25SW, N10E/85SE	Fault, Joint
7462-7482	3500	sedimentary	N80W/25SW, N10E/85SE	Fault, Joint
7478-7497	970	sedimentary	N80W/25SW	Joint
7492-7512	3000	sedimentary	N5E/85NW	Fault
7515-7530	1000	sedimentary	N80W/40SW, N10E/85NW	Fault, Joint
7535-7545	1000	sedimentary	N80W/40SW, N60W/80NE	Fault, Joint
7685-7705	1000	sedimentary	N80W/30SW, N10E/85SE	Fault, Joint
7705-7720	1000	sedimentary	N80W/30SW, N10E/85NW	Fault, Joint
7720-7740	700	sedimentary	N80W/30SW, N10E/85NW	Fault, Joint
7745-7755	600	sedimentary	N80W/35SW	Fault, Joint
7760-7772	1000	sedimentary	N80W/35SW	Fault, Joint
7775-7787	450	sedimentary	N80W/30SW	Bedding Joint
7782-7802	500	sedimentary	N80W/30SW	Bedding Joint
7803-7818	340	sedimentary	N80W/35SW	Bedding Joint
7820-7833	400	sedimentary	N80W/30SW	Bedding Joint
7835-7840	380	sedimentary	N80W/30SW	Bedding Joint
7842-7863	2200	sedimentary	N80W/30SW	Fault
7885-7905	700	sedimentary	N80W/30SW	Bedding Joint
7905-7925	300	sedimentary	N80W/30SW	Bedding Joint
7925-7940	1000	sedimentary	N80W/30SW	Fault
7942-7952	1000	sedimentary	N80W/30SW	Fault
10993-11010	1650	sedimentary	N80W/30SW, N10E/85SE	Fault, Joint
11015-11025	440	sedimentary	N80W/30SW, N10E/85SE	Fault, Joint
11026-11035	370	sedimentary	N80W/30SW, N10E/85SE	Fault, Joint
11042-11050	50	sedimentary	N70W/15SW,	Joint
11054-11065	205	sedimentary	N70W/15SW, N10E/85SE	Joint
11070-11080	225	sedimentary	N70W/15SW, N10E/85SE	Joint
11288-11300	1230	sedimentary	N80W/30SW, N10E/85NW	Fault, Joint
11315-11328	320	sedimentary	N80W/30SW, N10E/85NW	Fault, Joint
11329-11335	10000	sedimentary	N70-80W/80SW	Fault
11375-11390	1000	sedimentary	N5-15E/85NW	Joint
11391-11400	500	sedimentary	N80W/10NE	Bedding Joint
11693-11703	3500	sedimentary	N80W/15NE	Bedding, Fault

Table 1. Inflow rates of the first stage before grouting of the water way tunnel

Inflow Section(m)	discharge rate(m <sup>3</sup> /d)	Rock type	Fracture orientation	Remark
11705-11717	2900	sedimentary	N80W/15NE	Bedding,Fault
11718-11725	3000	sedimentary	N80W/15NE	Bedding
11727-11733	3460	sedimentary	N80W/15NE	Bedding
11786-11795	270	sedimentary	N80W/15NE	Bedding
11804-11813	80	sedimentary	N80W/15NE	Bedding
11823-11830	200	sedimentary	N80W/15NE	Bedding
11832-11839	460	sedimentary	N80W/15NE	Bedding
12073-12082	760	granite	N70-80E/60-75SE	Joint
12083-12094	690	granite	N70-80E/60-75SE	Joint
12104-12115	1070	granite	N70-80E/60-75SE	Fault
12298-12233	2270	granite	N30W/70NE	Joint
12574-12585	1400	granite	N10E/80SE	Fault
12585-12588	1065	granite	N10E/80SE	Fault
12589-12597	590	granite	N10E/80SE	Fault
12598-12604	685	granite	N10E/80SE	Fault
12604-12610	140	granite	N50-60W/60-70SW	Joint
12890-12894	95	granite	N70-80W/60NE	Joint
13094-13104	210	granite	N70W/70-80SW	Fault
13108-13117	430	granite	N70-80W/60-70SW	Fault
13179-13189	200	granite	N60-80W/75-85NE	Fault, Dyke
13189-13198	300	granite	N60-80W/75-85NE	Fault, Dyke
13346-13358	158	granite	N65W/70SW	Fault
13358-13363	2500	granite	N65W/70SW	Fault
13523-13535	790	granite	N30E55NW	Fault, Joint
13571-13583	1500	granite	N80W/40-50SW	Joint
13606-13618	345	granite	N80W/70-80NE	Joint
13770-13782	417	granite	N80E/30SE	Joint
13782-13788	455	granite	N85W/70SW	Joint
13888-13903	3000	granite	N50E/85NW	Fault
15789-15798	350	sedimentary	N70-80E/85NW	Fault
16730-16750	1500	volcanic	N55W/80SW	Fault
16759-16769	1000	volcanic	N75-85W/80-85SW	Fault
17275-17287	778	volcanic	N70-80W/70-80NE	Joint
17296-17308	540	volcanic	N70-80W/40-50SW	Fault, Dyke
17365-17377	625	volcanic	N75W/30SE	Fault, Joint
17387-17399	310	volcanic	N70-85E/45-55NE	Joint
17445-17450	360	volcanic	N40-50E/40-50SE	Fault
17451-17459	1145	volcanic	N40-50E/40-50SE	Fault
17459-17465	800	volcanic	N40-50E/40-50SE	Fault

Table 1. Inflow rates of the first stage before grouting of the water way tunnel

Inflow Section(m)	discharge rate(m <sup>3</sup> /d)	Rock type	Fracture orientation	Remark
17466-17478	205	volcanic	N40-50E/40-50SE	Fault
17547-17556	950	volcanic	N40-50W/85SW	Joint
17616-17628	300	volcanic	N50E/80NE	Fault
17637-17649	250	volcanic	N70E/55-60SE	Joint
17671-17683	200	volcanic	N70-80E/60-70SE	Fault
17775-17780	400	volcanic	N40-50E/40-50NW	Fault
17965-17980	2100	volcanic	N45-55E/85SE	Fault
19505-19515	500	volcanic	N70-80W/80SW	Joint, Dyke
19525-19530	10000	volcanic	N40-50E/80NE	Fault
19720-19735	200	volcanic	N70-80W/80SW	Joint
20960-20965	400	granite	N80E/65-75NW	Joint, Dyke
21020-21030	345	granite	N40-50E/85SE	Joint, Dyke
21045-21050	350	granite	N70-80W/60-70NE	Fault
23985-23996	350	granite	N70W/85SW	Joint
24290-24299	2000	granite	N70-80W/85SW	Fault
24330-24341	850	granite	N45-55E/15NW	Joint
24555-24570	8000	granite	N80-85W/80-85SW	Fault

일경 cs-18이 위치하고 있는 지점으로 터널이 통과하면서 10,000m<sup>3</sup>/day의 지하수가 이 지점으로 유출되었다. 이 지하수 유출로 인하여 cs-18의 1997년 11월의 지하수위는 지표하 92.55m로 10월의 8.18m에 비해 1개월만에 84.37m가 하강되었다. 이병대 등(2000)은 cs-18과 같이 일직선으로 급격하게 떨어지는 지하수위 하강 양상을 흡통형태(trough of depression)의 하강 양상으로 보고하였으며, Smith(1985)는 이와같은 흡통형태의 하강양상은 터널내로의 지하수 유출에 대한 주위 대수층의 반응이 터널로 향하는 방사상의 흐름이 아니라 선형적인 일차원 흐름이라는 강력한 증거라고 하였다. 세 번째 구간은 2사갱 북서 구간중, 13,358m~13,903m 구간으로 백사리에 해당되며, 이 구간에서 9,357m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었다. 이 구간의 지하수 유출은 주민들의 민원으로 인하여 터널 굴착작업이 일시 중단되었다가 다시 시작된 7~8월 이후의 터널 굴착시 유출된 것이다. 이 구간에 위치한 cs-44, cs-90, cs-93, cs-147 등의 수위는 터널 굴착 작

업이 일시 중단되었던 기간 동안은 대체로 미약한 상승 내지 거의 평행한 양상을 보이다가, 터널 굴진이 다시 시작되면서 발생한 많은 양의 지하수 유출로 인하여 7~8월 이후에 비교적 빠른 속도로 하강하였다. 네 번째 구간은 2사갱 남동 구간중, 16,730m에서 17,683m 구간으로 무계리에 해당되며, 터널 굴착시 11,463m<sup>3</sup>/day의 지하수가 초기에 유출되었다. 이 지하수 유출로 인하여 이 구간에 위치한 cs-31, cs-32, cs-81, cs-82, cs-96, cs-98 등의 지하수위는 터널 굴착전에 비하여 최소 30m에서 100m까지 하강되었다. 다섯 번째 구간은 3사갱 북서 구간중, 19,525m~19,530m 구간으로 조듬이 지역에 해당된다. 이 구간의 모암은 안산암질 응회암으로 30cm에서 1m의 폭을 가지는 암맥류가 3조 발달하고 있다. 암맥류의 접촉면에는 단층조선이 잘 발달되어 있는데 이는 조듬리 일대의 N40-50°E와 N60-70°W 방향의 단층구조 운동과 연관된 것으로 판단된다. 이들 3조의 암맥류중 하단부의 암맥 부근에 폭이 약 3m이고, 높이가 약 1m인 지하공동이

터널 우측벽에서 조들리 방향으로 발달되어 있다. 터널 굴착중 이 지하공동 구간을 통과하면서 10,000m<sup>3</sup>/day의 지하수가 이 지점의 터널내로 유출되었다. 이 지하수 유출로 인하여 cs-28, cs-29, cs-66, cs-76, cs-140 등의 지하수위는 150m에서 200m 이상까지 큰 폭으로 하강하였으며, 하강양상은 여우동에 위치한 cs-18과 마찬가지로 일직선으로 급격하게 떨어지는 홈통형태의 하강양상을 보여주고 있다. 여섯 번째 구간 역시, 3사갱의 북서 구간으로 24,290m에서 24,570m 구간이며 두마리 지역에 해당되며, 터널 굴착으로 10,850m<sup>3</sup>/day의 지하수가 이 구간으로 유출되었다. 이로 인하여 이 구간의 관측공인 113, 114, 115, 120, 121공의 지하수위는 터널 굴착전에 비하여 대부분 100m 정도 하강되었다.

## 5.2 유속 측정에 의한 구간별 유출

### 5.2.1 유속측정

터널내의 지하수 유출량을 측정하기 위한 방법으로는 용기로 직접 받아서 측정하는 방법과 구간별 유속을 측정하는 방법이 있다. 용기를 이용하는 방법은 터널내 지하수 유출지점의 정확한 양을 파악하는데 아주 좋은 효과가 있다. 그러나 연구지역 터널내의 실제 유출량은 터널 천정과 벽면에서의 유출보다는 터널 바닥에서 유출되는 지하수가 대부분이므로, 유출구간에 대한 전체 양을 파악하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서 그라우팅 이후의 구간별 유출량 측정은 유속을 측정하여 산정하였는데, 유속 측정은 주로 지표수의 유출량을 산정하기 위하여 이용되는 방법이다. 유출량의 계산은 하천의 단면을 여러개의 소단면으로 나누어서 각 단면에 대하여 수직으로 유속을 측정하여 각 소단면의 유출량을 합하여 특정 지점의 유출량을 계산하는 방법이다.

### 5.2.2 유출량 산정

Figure 5는 터널 입구로부터 거리에 따른 구간별 유출

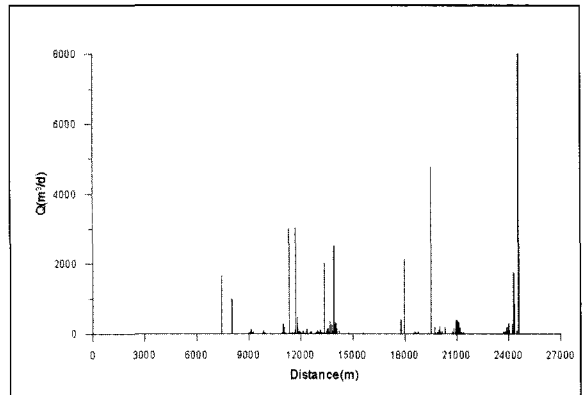


Figure 5. Relation between inflow rates after grouting and the distance from the entrance of tunnel.

량을 도시한 그림이다. Figure 5에서 그라우팅후 지하수 유출이 심했던 구간 역시, Figure 4와 마찬가지로 크게 6개 구간으로 세분할 수 있다. 그라우팅 전,후의 유출량을 비교해 보면 그라우팅후의 유출량은 42,844m<sup>3</sup>/day으로, 그라우팅전에 비해 많이 감소되었다. 또한 그라우팅으로 인한 지하수 유로의 변경 때문에 유출지점에는 약간의 차이가 있지만 유출구간에는 크게 차이가 없다. 이는 연구지역과 같이 터널 굴착으로 인하여 많은 양의 지하수가 일시에 유출된 경우에는, 터널내로 지하수가 일단 유입되고 난 뒤에 실시한 차수 그라우팅 효과는 완벽하지 않다는 것을 의미한다. 그리고 지하수 흐름은 단열을 따라 이루어짐으로 그라우팅으로 발생하는 유로 변경 역시, 최초의 유출지점으로부터 가까운 곳에 있는 다른 단열을 따라 다시 터널내로 유출된다.

Figure 5에서 터널내로의 지하수 유출이 심했던 6개 구간중, 1구간은 1사갱 북쪽 구간중 7,435m 내외 구간으로 찬거리 지역의 cs-37, cs-38, cs-39, cs-41이 위치하는 곳에 해당된다. 이 구간에서의 지하수 유출량은 1,648m<sup>3</sup>/day 로서 초기 유출량인 25,1828m<sup>3</sup>/day 와 비교하면 93.5%가 감소되었다. 2구간은 1사갱 남쪽 구간중, 11,000m에서 11,875m 구간으로 여우동, 신촌, 소근리 지역의 cs-7, cs-8, cs-10, cs-13, cs-14, cs-18, cs-78,



cs-79, cs-134가 위치한 곳에 해당되며, 이 구간에서 7,589m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었다. 이 구간에 위치하고 있는 관측공들은 그라우팅후에도 많은 양의 지하수가 유출됨으로써 계속 100m 내외의 수위하강을 보여주고 있다. 3구간은 2사갱 북서 구간중, 13,365m에서 13,920m 구간으로 백자리의 cs-44, cs-90, cs-93, cs-147이 위치한 구간에 해당되며, 이 구간에서 6,218m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었다. 4구간은 2사갱 남동 구간중, 17,780m에서 17,980m 구간으로 무계리 지역의 cs-31, cs-32, cs-81, cs-82, cs-96, cs-98이 위치하는 구간에 해당되며, 2,541m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었다. 이 구간은 그라우팅으로 인한 지하수 유로의 변경이 심하여, 그라우팅전 유출구간에 비해 그라우팅후의 유출구간이 많이 변경된 편이다. 5구간은 3사갱 북서 구간중, 19,520m 내외 구간으로 조듬리 지역의 cs-28, cs-29, cs-66, cs-76, cs-140이 위치하는 곳에 해당되며, 4,750m<sup>3</sup>/day의 지하수가 이 지점의 터널내로 유출되었다. 6구간은 3사갱의 북서 구간으로 24,295m에서 24,575m 구간이며 두마리 지역의 113, 114, 115, 120, 121 호공이 위치한 구간에 해당되며, 10,885m<sup>3</sup>/day의 지하수가 이 구간으로 유출되었다. 이 구간의 지하수 유출양상은 그라우팅전과 비교하여 변화가 없으며, 관측공의 지하수위 역시 대부분 100m 정도 하강되어 그라우팅전과 변화가 없다.

## 6. 터널내 유출구간의 단열구조

터널 굴착시 터널내로 유출되는 지하수의 대부분은 터널과 직교 혹은 사교하여 관통하고 있는 단층 및 단층운동과 관련된 단층 파쇄대와 연장성이 양호한 절리면들을 따라서 이동되고 있다. 터널내로의 지하수 유출은 구조선의 발달 양상이 터널과 직교 혹은 사교하여 터널을 관통하고 있는지, 혹은 터널을 관통하지 않는지의 여부에 따

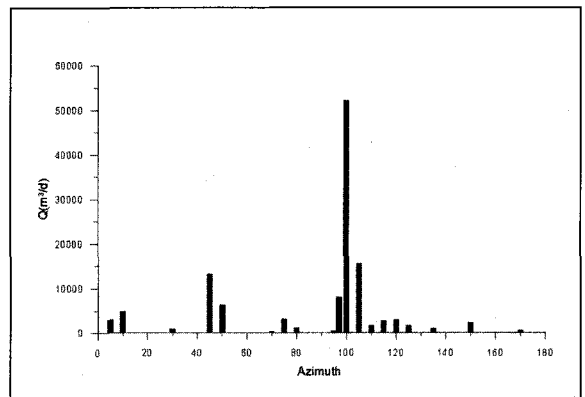


Figure 6. Relation between inflow rates of the first stage and fracture orientation.

라 유출 양상을 달리하고 있음을 알 수 있다. 연구지역 터널과 사교내지 평행하는 지질구조는 북북동, 북동 방향군의 구조와 서북서 방향군의 지질구조가 특징적이다. 연구지역의 남쪽에는 금천단층이 발달되어 있고, 또한 연구지역 전반에 걸쳐서도 금천단층과 평행한 수조의 절리 및 소규모의 단층들이 발달하고 있으며, 이들은 도수로터널과 사교하고 있다. 이들 서북서 방향의 구조보다는 연장 길이가 미약하나 연구지역에는 남북방향의 구조와 북동 방향, 동북방향의 지질구조들이 다수 발달되어 있으며, 이들은 도수로터널과 평행하거나 또는 도수로터널과 사교한다.

Figure 6은 터널 굴착으로 인한 터널내로의 초기 유출량과 단열구조의 방향과의 관계를 나타낸 그림이다. N75-85° W 방향의 단열대에서의 초기 유출량은 약 70,000m<sup>3</sup>/day로서 가장 심하게 유출되었다. 그다음은 N40-50° E 방향에서 17,100m<sup>3</sup>/day, N60-70° W 방향의 단열을 따라서 8,700m<sup>3</sup>/day의 지하수가 유출되었고, 이외에도 각각 N5-10° E, N70-80° E, N30° W, EW 방향의 순으로 지하수가 유출되었다. 이는 이들 단열구조위에 놓여있는 관측공들의 지하수위가 다른 방향대의 단열구조위에 위치하고 있는 관측공이나 혹은 단열구조위에 놓여 있지 않은 관측공들의 지하수위보다 훨씬 많이 하강되

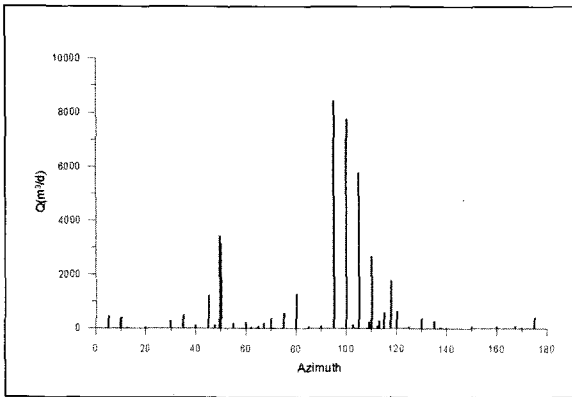


Figure 7. Relation between inflow rates after grouting and fracture orientation.

어 있는 사실과도 잘 일치하고 있다. Figure 7은 그라우팅 후 유속측정에 의해 산정된 구간별 유출량과 단열방향과의 관계를 도시한 그림으로서, 이 그림 역시, 주향의 분산은 조금 인지되나 대부분 N75-85° W 방향의 단열대와 N40-50° E, N60-70° W 방향의 단열에서 많은 양의 지하수가 유출되었다.

터널내로의 주된 유출지점은 여우동의 cs-6, cs-78, 신촌부근의 cs-13, cs-16, 소근리의 cs-18, 백자리의 cs-93, cs-136, 무계리의 cs-67, cs-81, cs-149, 조듬리 일대의 cs-28, cs-29, cs-66, cs-76, 두마리의 113, 114, 115, 120, 121호공이 위치한 구간에 해당되는 구간이다.

터널내의 지하수 유출에 영향을 미치는 단열들은 대체로 4조의 불연속면군으로 분류 할 수 있는데, 주 분포방향은 크게 TSet1 : N60-85° W, TSet2 : N40- 50° E, TSet3 : N10-20° E, TSet4 : N70-80° E 이다. 이들 단열들에 대한 매개변수들의 발달상태는 지표 노두에서의 단열발달 상태와 양상이 거의 같다.

여우동 지역은 EW 내지 WNW 방향의 층리면 및 층리 절리를 따라 터널내로 지하수가 유출되고 있다. 대부분의 층리면 및 층리절리면에는 단층조선들이 발달되어 있다.

백자리 지역은 N65-70° E와 N40-50° E· 80° SE 단열의 교차선이 지하수 유출을 지배하는 구조요소로, N65-

70° E 방향의 단열구조는 단열면을 따라 단층조선이 발달되어 있는 소규모 단층들이며, 방해석 세맥이 많이 발달되어 있으며, 간격은 1-2cm 이다.

무계리 지역은 N60-70° W 방향의 연장성이 양호한 절리 및 파쇄대를 따라 많은 양의 지하수가 유입되는 지역이다. 이들은 연장성이 양호한 신장절리로서, 암맥류의 관입과 연관성이 있고 단열면을 따라 변질광물들이 발달하고 있으며, 틈새 간격이 1-5mm로 대부분 방해석이 충전되어 있다.

조듬리 지역은 연장성이 양호한 단층대를 따라 터널내로 지하수가 유출되는 대표적 구간중의 하나이다. 이 지역일대에 발달하고 있는 N40-50° E와 N70-75° W의 단층구조와 밀접한 관계를 보여주고 있다. 이들 구조요소중 전자는 cs-28, cs-29, cs-76과 후자는 cs-66, cs-140과 관련된 구조요소이다.

두마리 지역은 금천단층이 도수로터널을 사교하는 지점에 위치하고 있으며, 이 단층 및 단층과 관련된 단열대를 따라서 많은 양의 지하수가 유출되었다.

## 7. 토의 및 결론

연구지역내의 터널 굴착 공사로 인하여 주위 대수층으로부터 많은 양의 지하수가 터널내로 유출되었다. 지하수 유출은 인위적인 양수와 마찬가지로의 효과로서 주변 지하수공들의 수위하강을 초래하였으며, 연구지역 일대 약 100km<sup>2</sup>에 대하여 수위하강 영향추(cone of depression)를 형성하였다(이병대 등, 2000). 그 결과, 주위의 지하수 수리시스템이 변형되었고, 지표수와 지하수의 고갈 현상이 발생하였으며, 주변지역 대수층의 지하수위를 저하시키는데 직접적인 영향을 미쳤다. 실제 초기 유출량과 그라우팅 후 유속 측정에 의해 산정된 구간별 유출량이 많았던 6개 구간의 주변 지역에 위치한 관측공들의 지하수위는 초기수위와 비교해 최소 50m에서 200m 이상까지 하

강하였다.

터널 굴착에 의해 지하수 유출이 심했던 6개 구간에 대해 그라우팅 전, 후를 비교해 보면, 초기 유출량이 120,990m<sup>3</sup>/day 이고, 그라우팅후의 유출량은 42,844m<sup>3</sup>/day 로서 초기 유출량에 비해 65% 감소되어 전반적으로 많이 줄었다. 그러나 이 구간들의 주변 지역에 있는 관측 공들의 지하수위는 그라우팅 전, 후를 비교하여 큰 차이가 없었다. 이는 차수 그라우팅 효과가 완벽하지 못하였고, 또한 초기 그라우팅 자체가 완벽한 차수를 시키는 것 보다는 작업공정의 용이성에 대한 목적이 더 컸기 때문이다. 또한 보통의 경우 양수정에서 적정량의 양수를 하고 양수를 중단하게 되면, 즉 응력을 제거하면 하강되었던 지하수위는 원래의 자연수위로 회복되는 탄성 거동을 하게 된다. 그러나 연구지역에서는 터널 굴착으로 짧은 시간에 아주 많은 양의 지하수가 급격하게 터널내로 유출됨으로써, 탄성한계에 가까워 지면서 응력을 어느 정도 제거하여도 이상적인 탄성 거동을 하지 못하는데 기인하는 것으로 해석된다. 그리고 터널 굴착으로 연구지역 대수층의 지하수가 터널내로 유출되면서 터널에서 가까운 주변의 포화대가 거의 고갈 상태가 되었고, 터널내로의 심한 유출로 인하여 지하수위가 급격하게 하강됨으로써 터널 주변 지역에 새로운 지하수 환경이 형성되었다. 게다가 그라우팅후에도 계속적으로 터널내로 많은 양의 지하수가 유출되기 때문에 그라우팅 효과로 어느정도 차수가 되었지만, 터널 굴착으로 지하의 상태가 대기압의 환경에 놓여 있으므로 터널내로의 유출 속도가 수위상승의 속도보다 더 큰 것에 기인한다. 연구지역 일대의 지하수는 이 새로운 환경에 대하여 평형을 이루기 위하여 터널에서 아주 먼 지역으로부터 지하수가 터널쪽으로 유동되고, 터널내로 일정량의 지하수를 유출시키면서 저하된 지하수위를 유지시킨다.

Figure 8은 연구지역의 암석별 지하수의 초기 유출량을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 터널내로의 지하수 유출량은 퇴적암 구간에서 약 65,000m<sup>3</sup>/day, 화강암과 화

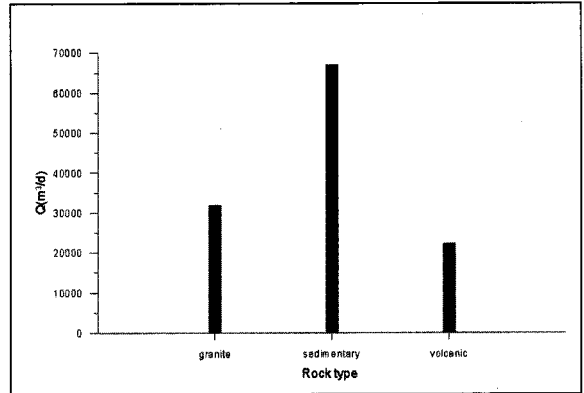


Figure 8. Relation between inflow rates of the first stage and rock type.

산암 구간에서 각각 약 35,000m<sup>3</sup>/day와 25,000m<sup>3</sup>/day 로서, 퇴적암 구간에서 가장 많은 양의 지하수가 유출되었다. 이는 퇴적암의 물리적인 성질 때문에 NATM 공법으로 터널을 굴착함으로써, 퇴적암에 우세하게 발달되어 있는 층리면 및 층리절리와 같은 단열구조가 더 많이 확장, 발생한 것에 기인되는 것으로 해석된다. Figure 5와 Figure 7에서 터널내로의 지하수 유출량이 N75~85°W 방향의 단열군에서 가장 많이 유출되고 있는데, N75~85°W의 단열군의 대부분은 연구지역내 퇴적암 구간에서 발달하고 있는 층리면 및 층리절리라는 사실로서 이와같은 해석이 가능하다. 실제 퇴적암 구간내에 위치하고 있는 여우동의 cs-7, cs-8, cs-10, cs-78, cs-79, cs-134 신촌 cs-13, cs-14, 찬거리 cs-37, cs-40, 원평 cs-41, 소근리 cs-16, cs-17, cs-18 등은 대부분 굴착 초기부터 100m 이상의 수위하강을 보여주고 있다. 이로써 퇴적암 구간 내에는 기존의 층리면, 층리절리와 더불어 발파공법에 의해 발생한 단열들의 공간적인 분포가 화강암 및 화산암 구간에 비해 우세함을 알 수 있다.

연구지역 터널내의 지하수 유출에 영향을 미치는 단열들은 대체로 4조의 불연속면군으로 분류할 수 있는데, 주 분포방향은 크게 TSet1: N60~85°W, TSet2: N40~50°E, TSet3: N10~20°E, TSet4: N70~80°E 이

다. 이들 단열들에 대한 매개변수들의 발달상태는 지표 노두에서의 단열발달 상태와 양상이 거의 같다. 이는 지표 노두상의 단열들이 연장성이 양호한 것으로 보아, 지표의 단열들이 연장 발달된 것으로 해석된다. Nur(1982)는 절리들의 기원에 대한 연구에서 절리의 하부로의 침투 깊이(penetration depth)는 절리 길이와 직접적으로 관계가 있다고 하였다. 터널 구간내에서 TSet1은 퇴적암 지역에서는 층리면 및 층리절리와 관련된 단열들이며, 그리고 화강암 지역에서는 금천단층 및 금천단층과 10~20 정도의 주향의 분산을 보이며 아평행(subparallel)하게 발달하고 있어, 이 단층과 관련된 단열로 해석된다. 상기한 바와 같이 터널내의 지하수 유출에 영향을 미치는 단열들은 연구지역 일대의 지하수가 흐르는 통로 역할을 하여 터널 굴진 작업으로 인하여 터널내로 많은 양의 지하수를 유출시켰고, 하나의 연장된 우물(extended well)로서 역할을 하는 지질구조대인 것으로 해석된다.

### 참고문헌

- 1) 김남중, 1992, 지질공학적 분석기술의 터널설계 적용에 관한 연구, 이학석사 학위논문, 서울대학교 지질학과, 148p.
- 2) 성익환, 이병대, 조병욱, 이봉주, 김통권, 이병주, 채병곤, 김경수, 김중렬, 현혜자, 이종철, 김복철, 이동우, 김원영, 1998, 영천댐 도수터널 공사지역 지하수 유동조사, 한국자원연구소, 419p.
- 3) 이병대, 성익환, 함세영, 조병욱, 김정숙, 박재현, 2000, 도수터널 굴착에 따른 주변지역의 지하수위 변동과 단열구조의 관련성 연구, 대한지질공학회지, 10(2), p.143-162.
- 4) 이봉주, 황재하, 1997, 경상분지 북동부에서의 기음단층과 양산단층과의 관계, 지질학회지, 33(1), p.1-8.
- 5) 이종운, 김선준, 전용원, 1996, 영천 도수터널 주변 지하수의 수리지구화학, 한국자원공학회지, 33(4), p. 211-225.
- 6) 조병욱, 성익환, 이병대, 추창오, 김통권, 이인호, 최경국, 김정숙, 1999, 터널내 구간별 지하수 유입량 산정방법 : 유속계의 이용, 대한자원환경지질학회지, 32(6), p. 661-667.
- 7) Chester, F. M., J. P. Evans, and R. D. Biegel, 1993, Internal structure and weakening mechanism of the San Andreas Fault, Jour. of Geophy, Research, 98(B1), p. 771-786.
- 8) Goodman, R. F., Moye, D. G., Van Schaikwyk, A., and Javandel, I., 1965, Groundwater inflows during tunnel driving, Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., 2(1), p. 39-56.
- 9) Morin, R. H., G. B. Carleton, and S. Poirier, 1997, Fractured-aquifer hydrogeology from geophysical logs: The Passic formation, New Jersey, Ground Water, 35(2), p. 328-338.
- 10) Nur, A., 1982, The origin of tensile fracture lineaments, Jour. of structure Geo., Vol. 4, p31-40.
- 11) Sen, Z., 1992, Unsteady ground-water flow toward extended wells, Ground Water, 30(1), p. 61-67.
- 12) Sen, Z., 1986, Aquifer test analysis in fractured rocks with linear flow pattern, Ground Water, 24(1), p. 72-78.
- 13) Shimogami, T., S. Osada, and Y. Taguchi, 1989, Excavation of a motor vehicular tunnel in the zone of a large quantity of groundwater, Tunnels and Water, 2, p. 1275-1282.
- 14) Tamio, S., S. Osada, Y. Taguchi, S. Ishikawa, and K. Suzuki, 1989, Excavation of a motor vehicular tunnel in the zone of a large quantity of groundwater, Tunnels and Water, 2, p. 1275-1282.
- 15) U.S. Department of the Interior, 1962, Stream-gaging procedures, U.S. Government printing office, Washington, 352 p.