

터널내 구간별 지하수 유입량 산정방법 : 유속계의 이용

조병욱* · 성익환* · 이병대* · 추창오* · 김통권* · 이인호* · 최경국* · 김정숙*

Calculation of Groundwater Inflow Rates with respect to the Subsection of Tunnel: Application of the Current Meter

Byong Wook Cho*, Ig Hwan Sung*, Byoung Dae Lee*, Chang Oh Choo*,
Tong Kwon Kim*, In Ho Lee*, Kyong Kook Choi* and Jung Sook Kim*

ABSTRACT: Estimation of inflow rates into subsection of a tunnel is important in establishing the proposed grouting part, measuring the degree of grouting, and settling the dispute over depletion of groundwater which may be resulted from tunnelling. A current meter was used to calculate inflow rates of groundwater to each subsection of the tunnel. The study area is composed of section 1 and 2 of Imha-Youngchun waterway tunnel which has 32.976 km length, with each section having 3,745 m and 4,079 m, respectively. The depth from ground surface to the tunnel ranges from 122.45 m to 358.3 m. Total inflow rates of groundwater into each section measured three times by the current meter, together with bottle and eye measurement, were compared with groundwater inflow rates of each section measured by datalogger. The calculated inflow rates of the sections by bottle and eye measurement were 8.8%~54.7% of real inflow rate (averaging 27.4%), whereas those by the current meter were 76.9%~110.6% (averaging 92.9%). Therefore, the current meter is regarded as an useful method to calculate groundwater inflow rates into subsections of a tunnel.

서 언

우리나라의 지질특성상 지하공동으로의 지하수 유입은 불연속면의 특성에 달려있다고 볼 수 있다(강병무 외, 1933). 최근 지하철건설, 대규모공사 등 지하공간 개발의 증가에 따른 지하수 유동체계의 변화로 인해서 지하수와 관련된 다양한 문제가 발생되고 있다. 연구지역인 경북 임하-영천간 도수로 터널구간도 터널 굴진으로 인해서 터널굴착면 주위의 지하수 수리시스템이 변형되어 지표수와 지하수의 고갈이라는 민원이 제기되어서 터널내로 유입되는 지하수의 양과 유입구간 파악의 필요성이 대두되었다. 터널구간별 지하수 유입량 변화의 측정은 민원문제 해결에 중요한 자료가 될 수 있을 뿐더러 지하수위 변화 관측과 함께 차수를 위해서 실시한 그라우팅 작업의 효과정도 파악에도 유용

한 자료가 될 수 있다(김치환 외, 1993).

터널내에서 각 지점별로 유입되는 지하수의 양을 측정하기는 사실상 어렵다. 이는 터널내로 유입되는 지하수의 형태가 다양하여 천장에서 떨어지는 형태, 벽면을 타고 흘러내리는 형태, 터널바닥에서 용출되는 형태 등으로 나타나기 때문이다. 본 논문은 각 지점별 지하수 유입량을 측정하기는 어렵지만 터널내 특정구간의 지하수 유입량을 산정하기 위한 하나의 방법으로서 유속측정을 이용한 결과이다. 유속계로 산정된 각 구간별 지하수 유입량은 동시기에 용기(bottle)와 목측으로 계산된 결과와 함께 실제로 터널내로 유입되는 지하수의 양과 비교하여 본 방법의 타당성을 검토하였다.

지형 및 지질

연구지역은 임하-영천 도수로 터널구간 중에서 1사갱과 2사갱의 굴진구간으로서 행정구역상으로는 청송

* 한국자원연구소 (Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Taejon 305-350, Korea)
E-mail: cbw@rock25t.kigam.re.kr

군 안덕면, 현서면 일대이다. 이 지역의 해발고도는 1사갱의 우측인 보현천에서 290 m 내외로 최저이고 최고는 2사갱 우측의 현서면과 현동면의 경계에서 약 970 m를 보여서 지형경사가 급한 편이다.

연구지역은 한반도 동남부에 위치하는 경상 퇴적 분지내의 영양지괴, 의성지괴, 밀양지괴 지역중에서 의성지괴 지역에 위치하며 1:50,000 구산동지질도의 동측에 해당된다 (Fig. 1). 이 지역의 지질은 크게 3대분 된다. 즉, 1사갱 구간은 하양층군의 춘산층으로 되어 있으며, 층후는 약 700 m이며 사암과 셰일의 호층으로서 암색은 저색, 녹회색, 회색이다. 2사갱의 북쪽끝 구간은 불국사 관입암인 화강암류인데, 주 암석은 아다멜라이트, 석영 본조니암이다. 본 암류는 그 입도가 전역에 걸쳐서 균등하나 암체의 주변부는 비등립질인 반암으로 산출된다. 2사갱의 남쪽구간은 유천층군의 산성화산암류로 구성되는데, 지형적으로 고지형을 이룬다. 이 화산암류는 유문암질 응회암, 용결응회암, 유문암으로 이루어져 있다 (장기홍, 1978).

조사지역의 지질구조는 북북동 방향군과 서북서 방향군의 지질구조가 특징적이다 (한국자원연구소, 1998). 조사지역 남쪽에는 서북서 방향의 지질구조가 우세한데 이들은 도수로터널과 사교하고 있으며 조사지역 북쪽에 우세한 남북 내지 북북동 방향의 지질구조는 도수로터널과 평행 또는 사교하고 있다.

터널현황

임하-영천 도수로터널은 1994년 1월부터 시작하여 2000년 12월까지 굴진완료 예정으로 되어 있다. 터널의 길이는 총 32.967 km이며 직경은 3 m이다. 터널의 경사는 입구쪽인 안동시 길안면 송하리 (해발고도 183 m)에서 영천시 자양면 충효리 (해발고도 162 m) 쪽으로 0.637% 경사진 자연유하식 터널이다. Fig. 2는 터널의 단면도인데 그림에서 보는 바와 같이 조사구간 중에서 지표와 터널까지의 깊이는 최소 122.45 m에서 최대 358.3 m이다. 굴진 공법은 1사갱 구간은 TBM, 2사갱 구간은 발파식이었다. Table 1은 유속계로 1, 2사갱의 구간별 지하수 유입량 측정당시의 터널굴진 현황으로서 각 사갱의 중심에서 남북방향으로 굴진하고 있다. 조사기간 동안의 굴진길이는 1사갱 구간이 3,419 m에서 3,745 m, 2사갱 구간이 3,549 m에서 4,078 m이다.

지하수의 유입이 터널 굴진에 미치는 영향은 다양하고 이에 따라서 지하수 유입에 대한 처리가 달라지나 일반적으로 배수방법과 차단방법이 많이 적용된다 (Takashi, 1988). 통상적으로 굴진도중 지하수 유입량이 0.2~0.3 m³/day 이상이면 그라우팅 작업을 하는 것으로 되어 있으나 (이용직, 1995), 본 지역의 터널굴진에서는 지하수 고갈이라는 민원문제로 인해서

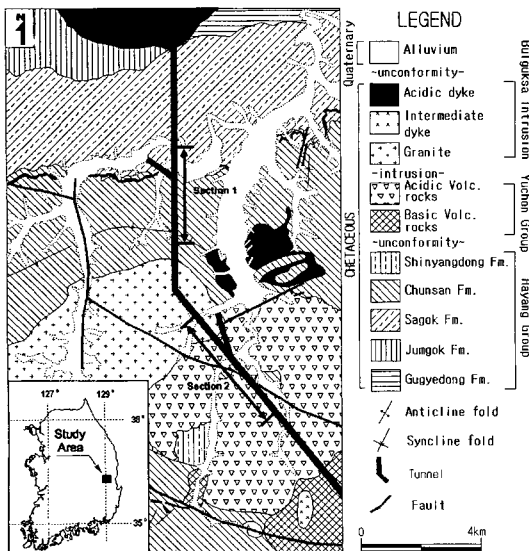


Fig. 1. Location and geological map of the study area.

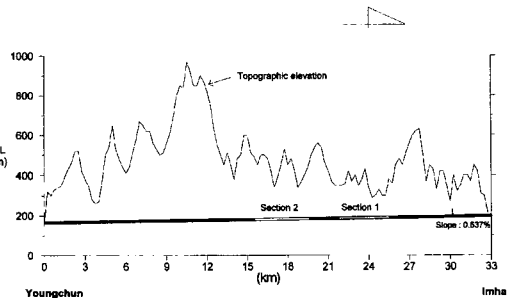


Fig. 2. Cross section of the water way tunnel.

Table 1. Tunnel lengths of section 1 and 2 at three times discharge measurement.

Date	section 1 (m)	section 2 (m)
Feb. 28, 97	3, 419 (22, 033~25,452)	3,549 (15,718~19,177)
Jul. 30, 97	3,508 (21,977~25, 474)	3,636 (15,653~19,289)
Oct. 15, 97	3,745 (21,792~25,537)	4,078 (15,516~19,594)

0.2~0.3 m³/day 이하도 그라우팅 작업후에 굴진이 계속되었다. 그라우팅으로도 완전히 차단되지 못한 지하수는 유입량에 따라서 다르나 50~200 m마다 집수시설을 설치하여 릴레이식으로 터널 바깥쪽으로 배수되고 있다.

지하수 유입

일반적으로 지표수 또는 지하수의 터널내의 유입은 지표면과 직하 터널까지의 거리, 터널로부터의 거리, 터널굴진 경과시간, 강수량, 지질, 지질구조 등 여러 요인에 의해 지배를 받는다. 본 지역 터널내로의 지하수 유입은 이 지역이 암반층임과 지표면과 터널까지의 깊이가 깊어서 주로 지질구조의 영향을 받고 있는 것으로 드러났다. 한국자원연구소 (1998) 에 따르면 사암과 셰일의 호층으로 이루어진 춘산층 (1사갱) 구간의 지하수 유입은 지질구조선과 층리면의 영향을 동시에 받고 있으며, 산성화산암류와 화강암류로 이루어진 2사갱 구간에서는 지질구조선을 따라서 지하수가 유입되고 있다. 지하수 유입에 영향을 미치는 열극들은 대체로 4조의 불연속면군으로 분류할 수 있는데, 주 분포방향은 N60-80°W, N10-15°E, N30-50°W, N70°E이다.

Fig. 3은 터널로 부터의 거리가 다른 두 지하수공 (CS-17, CS-18)의 지하수위 변화를 나타낸 것이다. 지하수공 CS-17은 1사갱의 남쪽끝 직상부에 위치해 있어서 1차유속 측정시에 이미 지하수위가 낮아지고 있다. CS-18은 CS-17보다 남쪽으로 약 300 m, 터널굴진 방향좌측으로 약 50 m 떨어진 지하수공으로서 1차 유속 측정시(1997. 2. 26) 에는 영향을 받고 있지 않으나 2차 측정시(1998. 7. 31) 부터 지하수위가 낮아지고 있다.

터널내로 유입되는 지하수는 지질구조에 따라서 여러 가지 형태로 나타나기 때문에 그 유입량을 측정하기는 어려운 실정이다. 스웨덴 SRF 처분장에서 관찰된 일반적인 지하수의 유입형태는 열극의 형태, 교차 등에 따라서 6종류로 나뉘었다 (Nerentnieks *et al.*, 1989). 즉, 터널 천장에서 떨어지는 형태가 있는가 하면 터널벽면을 타고 내리는 경우도 있고 육안으로는 보이지 않지만 터널바닥에서 용출하는 형태 등도 있다. 또한 이들의 복합적인 형태가 나타나기도 하여 어떤 한 지점에서의 정확한 유입량을 알기는 어렵다. 따라서 1, 2사갱 구간의 지하수 유입량은 다음의 3가지 방법으로 측정 또는 추정하여 각 값들을 서로 비교하였다.

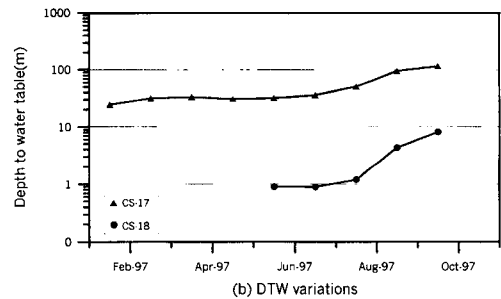
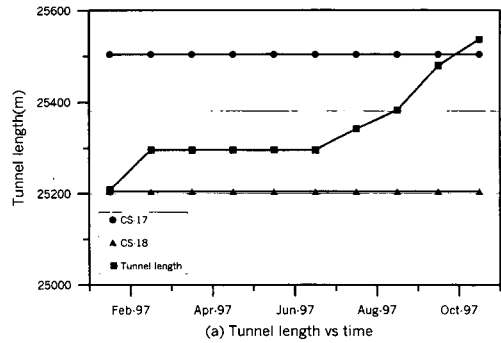


Fig. 3. Relationship between tunneling and DTW (boreholes CS-17 and CS-18) (a) Tunnel length vs time (b) DTW variations.

유입량 산정

유량계에 의한 전체 유입량

터널내 유입량 조사구간인 1, 2사갱의 중심부에는 각 사갱의 전체 굴진구간에서 유입되는 지하수를 한 곳으로 모아서 지표로 배출시키고 있다. 유량계는 여기서 배출되는 지하수의 양을 자동으로 측정하기 위하여 지표에 설치된 것이다. 1, 2 사갱에 설치된 유량계는 선 엔지니어링사 제품으로서 검출방식은 플로트 (float) 식, 측정범위는 0~687 m³/h, 측정오차는 ±1%이다. 본 방법은 각 사갱의 전체 유입량은 정확하게 알 수 있지만 각 사갱의 구간별 유입량은 파악할 수 없다는 단점이 있다.

유속계에 의한 터널내 구간별 유입량 측정 당시 1, 2 사갱에서 배출시키고 있는 터널내 지하수 유입량은 1사갱은 7,845~9,640 m³/day이고, 2사갱은 5,886~8,179 m³/day 범위이다 (Fig. 4). 이 배출량은 굴진구간의 확대, 굴진 경과시간, 산발적으로 이루어지는 그라우팅 작업 등에 의해 변화가 있었을 것이다. 이 배출량에는 또한 터널굴진에 사용하기 위하여 지표에 개발되어 있는 지하수 주입량 (100~200 m³/day) 도 포함되어 있

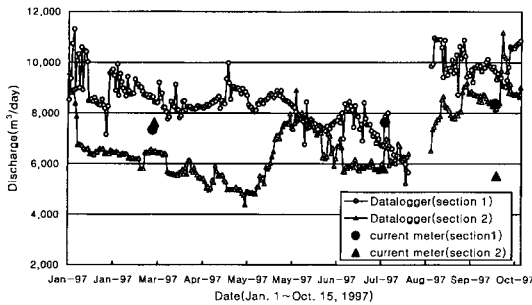


Fig. 4. Recorded discharge rates by datalogger at section 1 and 2.

으나 이 양은 무시하였다.

용기와 목측에 의한 지점별 유입량

용기를 사용하여 터널내 지하수 유입량 측정이 가능한 경우는 다음과 같다. 즉, 천장과 벽면에서 산발적으로 떨어지는 것은 직경이 1.2 m인 원뿔모양의 깔대기와 용기를 이용하여 유입량을 측정하였으며, 한 지점에서만 떨어지는 지하수 양은 2 L의 메스실린더를 이용하였고, 호스 등을 통한 지하수 유입량이 많은 경우는 5 L의 용기를 사용하였다. 그 밖에 벽면을 타고 흐르는 유입량은 조사자의 경험적인 목측으로 측정하였다.

본 방법은 용기로 측정한 수량은 각 지점별로 정확하게 알 수 있다는 장점이 있지만 벽면을 타고 흘러내리는 유입량은 조사자의 목측에 의해서 추정되었다는 단점과 레일이 깔여 있는 터널의 바닥을 통해서 유입되는 지하수량은 전혀 고려하지 못하였다는 단점이 있다. 3차레에 걸쳐 측정된 지하수 유입량은 1사갱에서는 757~2,031.7 m³/day이고 2사갱은 1,209.4~3,557.1 m³/day의 범위이다.

유속계에 의한 구간별 유입량

유속 측정은 주로 지표수의 유출량을 산정하기 위하여 하천의 단면에 대하여 수직으로 유속을 측정하여 각 소단면의 유출량을 합하여 특정지점의 유출량을 계산하는 방법이다. 연구지역인 도수로터널의 경사는 임하에서 영천쪽으로 0.637% 경사져 있다. 그러나 각 사갱별로 굴진도중 터널내로 유입되는 지하수를 지표로 배출시키기 위해서 50~20 m마다 집수시설이 설치되어 있다. 따라서 집수시설이 위치한 지점은 터널내에서 지형적으로 낮은 지역이 되고 집수시설과 집수시설 사이

$$Q = a_0 \times 1/2(V_0 + V_1) + a_1 \times 1/2(V_1 + V_2) + \dots + a_{n-1} \times 1/2(V_{n-1} + V_n)$$

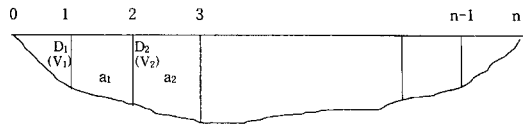


Fig. 5. Cross section of discharge measurement by current meter.

는 일종의 분수령의 역할을 하고 있다. 유속측정은 집수시설의 바로 양쪽에서 측정되었는데 측정이 용이하지 않은 구간과 측정하기에 너무 적은 유입량은 목측에 의존하였다. 유속측정 시에는 측정구간 내에 배수관의 파손에 따른 인위적인 지하수의 유입이 없도록 세심한 주의를 기울였다.

각 터널구간에서의 유입량 산정은 Fig. 5의 모식도와 같은데 유출량의 계산은 하천의 단면을 여러 개의 소단면으로 나누어서 각 소단면의 유출량을 더하는 것이다. 유속측정 방법은 측정지점의 폭이 대개 0.8 m 미만이므로 심도도 0.2 m 미만이어서 1점법 (Sixth-tenth-depth) 를 이용하였다 (U.S. Department of the Interior, 1962). 터널구간별 유입량을 측정하기 위해서 사용한 기기는 Toho CM-10S였는데 측정유속의 오차범위는 ±2% 이내이다. 기기제작 당시의 경험식에 의한 유속은 식 (1)이었으나 1997년 한국표준연구원에서 보정된 경험식은 식 (2)와 같다.

$$V = 0.117N + 0.008 \tag{1}$$

$$V = 0.11N + 0.02 \tag{2}$$

여기서 V: 유속 (m/sec)

N: 초당 회전수

3차레에 걸친 유속 측정경과는 Table 2, 3과 같은데 측정시기별 지하수 유입량의 대비는 불가능하였다. 이는 각 측정시기별 그라우팅 구간이 다르고, 유료가 계속 변할 뿐더러 굴진구간이 계속 늘어나기 때문이었다.

유입량 대비

유량계로 측정된 1, 2사갱의 터널내 지하수 총 유입량과 목측과 용기에 의한 총 유입량, 유속계에 의한 총 유입량 결과는 Table 4에서 보는 바와 같다. 1, 2 사갱에 대해서 3차레에 걸쳐 용기와 목측으로 측정된 지하수 총 유입량은 752 m³/day~3557 m³/day로 계산되었다. 그러나 동시기에 유량계에 의해서 자동으로 측

Table 2. Results of discharge measurements by current meter at section 2.

1st (Feb. 26, 1997)		2nd (Jul. 31, 1997)		3rd (Oct. 14, 1997)	
Subsection (m)	Q (m ³ /d)	Subsection (m)	Q (m ³ /d)	Subsection (m)	Q (m ³ /d)
15618-15698	286.5	15753-15813	703.8	15598-15643	400
15783-15787	592.2	15963-16020	623.8	15643-15670	357.5
15816-15823	879.8	16190-16260	131.3	15670-15723	273.3
15823-15873	407.9	16260-16333	706.3	15723-15783	40*
16023-16333	75.7	16803-16918	40*	15783-15838	371.3
17323-17383	480.4	17009-17037	88.8	15838-15885	100*
17440-17518	326.6	17037-17093	274.6	15885-15988	214.2
17641-17731	281.9	17253-17298	230.5	16064-16118	381
18443-18568	1696.7	17298-17383	599.4	16803-16918	80
18690-18708	856.6	17383-17413	185.3	16190-16260	151.2
18708-18723	665.5	18578-18633	30*	17037-17039	310.4
18897-18973	640	18683-18711	273.3	17093-17125	50*
		18893-18956	1284.2	17125-17153	100.3
		18956-18970	100*	17153-17273	290.5
		18973-19078	275.7	17273-17383	175.7
		19133-19215	279.7	17383-17683	323.2
				18223-18723	110
				18723-18808	100
				18863-18955	1232.7
				18955-18973	284.4
				18983-19023	30
				19028-19078	161.5
				19078-19193	200
				19193-19293	159*
				19293-19323	400
Total	7,189.8		5,826.7		6,287.2

*: estimated

Table 3. Results of discharge measurements by current meter at section 1.

1st (Feb. 27, 1997)		2nd (Aug. 1, 1997)		3rd (Oct. 14, 1997)	
Subsection (m)	Q (m ³ /d)	Subsection (m)	Q (m ³ /d)	Subsection (m)	Q (m ³ /d)
22115-22151	400*	22070-22080	300*	21870-22143	1718
22820-22890	191.7	22820-22895	251.8	23010-23130	150
22890-23010	126.3	23110-23130	245.6	23207-23400	205.2
24050-24200	253.5	23207-23400	368	23400-23510	100*
24200-24440	412.3	23400-23510	117.9	23800-23840	50*
24620-24745	185.7	23702-23800	257.1	23840-23890	200
24745-24800	89.9	23800-23840	109	23890-23935	171.4
24800-24960	407.7	23840-23890	572.7	23935-24200	966.9
24960-25023	1022.3	23890-23935	260.4	24225-24450	1503.9
25023-25190	2627.7	24200-24450	921.5	24650-24745	309.5
25190-25410	1627.3	24650-24745	233.2	24745-24800	50*
		24745-24800	129.2	24810-24960	1000
		24800-24960	377.5	24985-25027	300
		24960-25023	780	25407-25570	1647.9
		25023-25190	1160.1		
		25190-26106	1548		
Total	7,344.4		7,632.0		8,372.0

*: estimated

Table 4. Calculated inflow rates into section 1 and 2 by three methods (datalogger, current meter and bottle and observation).

		Datalogger (m ³ /d)	Current meter (m ³ /d)	Bottle and observation (m ³ /d)
Section 1	1st	8,500	7,344	757
	2nd	7,845	7,632	1,896
	3rd	9,640	8,373	2,032
Section 2	1st	6,500	7,190	3,557
	2nd	5,886	5,827	1,209
	3rd	8,179	6,287	2,921

정된 지하수 총 유입량은 5,886 m³/day~9,640 m³/day으로 나타났다. 이 수치로 볼 때 용기와 목측에 의한 유입량은 유량계로 측정된 유입량의 8.8%에서 54.7%에 불과하고 오차범위도 넓게 나타나고 있다. 평균적으로는 유량계 유입량의 27.5%에 불과하다.

유속계에 의한 터널내 총 유입량은 6,287 m³/day~8,373 m³/day의 범위를 보이는데 이는 유량계에 의한 유입량의 76.9%에서 110.6%에 해당된다. 1, 2사갱 구간에서 각각 3회씩 측정된 6회의 평균값은 유량계로 측정된 유입량의 92.9%에 해당된다. Fig. 6은 유량계와 유속계에 의한 지하수 유입량의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 2사갱 구간에서 3번째 측정된 유입량을 제외하고는 실측치에 가까이 놓임을 알 수 있다. Fig. 4에는 유량계에 의해 자동으로 계산된 1, 2사갱 구간의 일 지하수 유입량의 변화와 함께 1, 2사갱에서 3회에 걸쳐 유속계로 계산된 지하수 유입량의 변화를 나타낸 것이다. 유속계에 의한 지하수 유입량은 2사갱의 3차 측정치를 제외하고는 유량계로 측정된 일 지하수 유입량과 대체로 비슷함을 볼

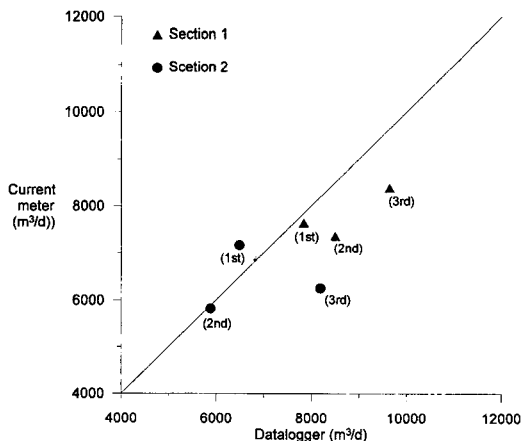


Fig. 6. Discharge by datalogger vs. discharge by current meter.

수 있다.

유량계에 의해서 측정된 터널내의 지하수 유입량은 정확하다는 장점이 있다. 그러나 이는 굴진된 터널 전체의 지하수 유입량을 나타낼 뿐 구간별 지하수 유입량은 알 수가 없다. 한편 1, 2사갱에 대해서 3회에 걸쳐서 유속계에 의해서 계산된 지하수 유입량은 유량계 유입량보다 1회는 10.6% 높게 산정되었으며, 다른 1회는 23.1% 낮게 계산되었지만 평균 92.9%에 달한다.

Fig. 7은 1, 2사갱에 대해서 3회에 걸쳐서 유속계로 측정된 구간별 지하수 유입량 결과를 도시한 것으로서 터널의 굴진길이에별 지하수 유입구간과 유입정도를 알 수 있어서 지하수 고갈로 인한 민원문제 해결의 기초 자료, 치수를 위해 실시한 그라우팅의 정도 파악에 이용될 수 있을 것이다. 전반적으로 보아서 지하수의 유입은 1, 2사갱의 막장부분과 지형고도가 낮은 하천과

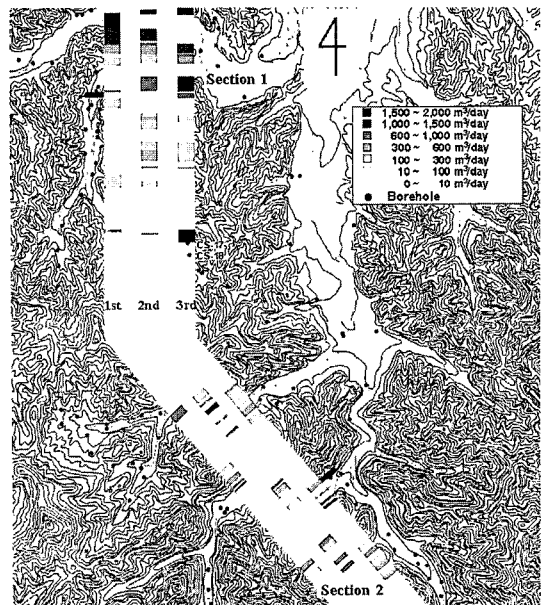


Fig. 7. Map showing inflow rates of each subsection.

의 교차점에서 높은 유입을 보이고 있다. 막장부분에서 지하수 유입량이 많은 것은 굴진 경과시간이 얼마 되지 않았고 또한 아직 그라우팅이 이루어지지 않았기 때문으로 보이며, 하천과의 교차점에서 유입량이 많은 것은 구조선에 의한 것으로 판단된다.

결 론

터널굴진으로 인한 지하수의 유입은 필연적이다. 굴진구간 중에서 지하수 유입지점과 유입량의 파악은 효율적인 굴진작업과 터널굴진으로 인한 민원문제 해결 등에 있어서 중요하지만 지하수의 유입형태가 다양하기 때문에 쉽지 않다. 터널내 지하수 유입구간과 유입량산정의 한 방법으로서 임하-영천 도수로터널의 1, 2사갱 구간에서 3회에 걸친 유속측정으로 지하수 유입량을 계산하였으며 이를 유량계에 의해서 측정된 지하수 유입량과 비교하였다.

용기와 목측으로 계산된 1, 2사갱의 지하수 유입량은 동시기 유량계 유입량의 8.8%~54.7%로서 오차범위가 크고 평균 유입량도 27.5%에 불과하다. 그러나 유속계로 계산된 1, 2사갱의 지하수 유입량은 동시기 유량계 유입량의 76.9%에서 110.6%로서, 평균 유입량은 92.9%에 해당되기 때문에 비교적 정확하다고 볼 수 있다. 따라서 터널내 특정 지점의 유입량은 알 수 없지만 소 구간별 지하수 유입량의 파악에는 유속계가

중요한 도구가 될 수 있다고 판단된다.

참고문헌

- 강병무, 김천수, 배대석, 김경수, 기정석 (1993) 분리열극개념을 이용한 지하공동 주변의 지하수유동 해석, 지질공학, 3권 2호 p. 125-148.
- 김치환, 박창우, 이석천 (1993) 원유 저장용 지하공동의 건설중 점토 그라우팅에 의한 지하 수제어. 터널과 지하공간, 3권 p. 24-32.
- 장기홍 (1978) 경상분지의 층서, 퇴적 및 지구조(II). 지질학회 14, p. 120-135.
- 한국자연연구소 (1998) 영천댐 도수터널 공사지역 지하수 유동 조사. p.419.
- 이용직 (1995) 수갱공사의 기술적 문제에 대해서(V). 터널과 지하공간, 5권 p. 57-69.
- Li, H. and H. Kagami (1996) Groundwater level and chemistry changes resulting from tunnel construction near Mastsumoto city, Japan. Environmental Geology V. 31, p. 76-84.
- Nerentnieks I. et al. (1989) Some recent observations of channelling in fractured rocks-Its potential impact on radionuclide migration, Proc. Conf. on Geostatistical, sensitivity, and uncertainty methods for groundwater flow and radionuclide transport modelling, 87 DOE/AECL, Battelle Press p. 387-410.
- Takashi, (1988) Influence of water inflow for tunnelling and countermeasures. Tunnels and water, p. 597-604.
- U.S. Department of the Interior (1962) Stream-gaging procedures. U.S. Government printing office, Washington, p. 352.

1999년 5월 13일 원고접수, 1999년 6월 20일 게재승인.