

RMR 및 Q 분류시 지하수 조건 평가방법에 관한 사례 연구

이대혁^{1)*}, 이철욱¹⁾, 김호영¹⁾

A Case Study for Evaluating Groundwater Condition in RMR and Q Rock Mass Classification on Hard Rock Tunnel

Dae-Hyuck Lee, Chul-Wook Lee and Ho-Yeong Kim

Abstract For RMR and Q rock mass classification at the design and construction stage, evaluation of groundwater condition is usually based upon the experience due to the restriction of available methods. Based on the results of Taejon LNG Pilot Cavern which acquire joint water pressure, inflow rate of ground water and hydraulic conductivity model, estimates from numerical analysis and analytical solutions were compared to verify each evaluation method. As the result, the Raymer(2001) approach was found to be efficient for estimating inflow rate and corresponding value.

KeyWords: RMR, Groundwater, Jw, Analytical solution, Hydraulic conductivity model

초 록 터널 조사계획 혹은 공사중, RMR 및 Q분류법에 따라 암반분류를 수행하는데 있어 지하수조건에 대한 평가는 가능한 조건들의 제약 때문에 경험적 방법에 의존하고 있다. 절리 수압 및 지하수 유입량 측정, 수리전도도 모델 산정, 3차원 수치해석 및 해석해 방법을 사용한 대전 LNG Pilot Cavern의 결과를 바탕으로, 지하수 조건 평가에 관한 합리적인 접근 방법을 비교 검토하였다. 그 결과, Raymer(2001) 이론해 방법이 예비 조사단계에서 유용한 도구로 활용될 수 있음을 검증하였다.

핵심어: RMR, 지하수 조건, Jw, 이론식, 통계적 수리전도도 모델

1. 서 론

터널 조사계획 혹은 공사중, RMR 및 Q 분류법에 따른 암질평가를 수행하는데 있어 다양한 평가항목 중에서도 지하수 조건(Q분류 Jw)은 항상 관건이 되고 있다. 대부분의 조사자 혹은 설계자들은 값의 선정에 있어, 평가방법의 다양성 때문에 매우 어려워하거나 오히려 쉽게 직관적으로 판단해버리는 경향이 있다. 왜냐하면, 지하수조건 평가방법 자체가 터널 10 m당 분당 지하수 유입량, 절리수압 대비 최대주응력의 비 혹은 seepage 조건에 대한 직관적인 판단에 의존하는 3가지 방법을 선택적으로 선정할 수 있기 때문이다. 더욱이, 터널 설계 조사단계에서는 시추공, 시추코어, 각종 수리시험

자료에만 의존해야 하므로 가장 정량적이고 객관적인 평가가 가능한 지하수 유입량 평가방법을 활용할 수 없기 때문이다. 물론 공사중 암질평가시에도 정확한 지하수 유입량 산정이 현장 여건 때문에 쉽지는 않다.

본고는 대전 LNG Pilot Cavern에 대한 각종 수리 시험 결과인 공동내 유입량 및 절리수압 등의 측정 자료와 지하수 유동해석 결과인 수치해석 자료 및 지하수 유입량 예측법인 Heuer(1995) 및 Raymer(2001) 이론해 결과를 바탕으로 한 비교 검토를 통해 각 경우의 지하수 조건 판정 결과를 비교해봄으로서 지하수 조건 산정에 관한 이해를 돕고자 작성하였다. 물론 본 사례는 특정한 암반 부지 조건에 해당하는 하나의 일례일 뿐이며 다른 현장 암반 조건에 대해서는 다른 결과를 초래할 수 있을 것이다. 그러나 본 논문의 결과를 통해 지하수 조건 평가시 어떠한 점을 관심 있게 고려해야 하는지에 대한 단초를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

¹⁾ SK건설(주) Geotask 팀

*교신저자(Corresponding Author): dhlee-d@skec.co.kr

접수일: 2003년 7월 7일

심사 완료일: 2003년 8월 22일

2. 지하수 조건에 관한 이해 및 기존의 평가방법

RMR 분류법에 따른 암질 평가요소에 있어 지하수 상태에 관한 평가 항목인 지하수 조건은 Table 1과 같이 세 가지 다른 평가방법을 활용할 수 있다.

지하수 조건 선정과 관련하여 RMR 분류법에 고유하게 내재되어 있는 어려움은 다음과 같다.

RMR 분류는 해당 부지 암반을 단층과 같은 확연한 구조대나 암 경계와 같은 경계로 균질영역을 분류하고 해당 영역을 평가하게 되므로, 하나의 영역은 터널 규모에 따라 수 m에서 수 백 m까지 일수도 있다. 또한 절리와 같은 불연속면의 발달 특성에 근거하여 세부적인 영역분할이 가능하다. 그러나 지하수 조건에 따른 영역 분할은 특정 함수대 및 함수를 동반한 파쇄대가 출현하지 않으면 불가능하기 때문에, 지질조건, 강도조건, 불연속면 조건, 물리탐사결과를 이용한 분할 등에 의존할 수밖에 없게 된다.

또한 대부분의 우리나라 경암 터널 10 m당 지하수 유입량 평가를 수행하는데 있어서, 터널 벽면을 따라

전체 암벽면에서 유입되는 경우는 거의 없고, 주요한 1~2개의 water carrying main joint를 따라 수 개소에 서 지하수가 유입되는 경우가 보통이다. 예를 들어, 물 방울이 떨어지는 정도인 dripping은 실제 측정을 수행해보면 수 l/hr, 물이 흐르는 정도인 flowing은 수십 l/hr에 불과해 유입 개소가 10 m 당 수 개소라 가정하면 수십~수백 l/hr에 불과해 표 1에서와 같이 각각 1500~7500 l/hr, >7500 l/hr와는 큰 차이를 보이게 된다. 결국 지하수 조건 평가항목의 3가지 평가방법간의 상호 관련성이 경암반 터널의 경우 매우 적을 수 있다.

Q 분류법에 따른 암질 평가요소에 있어 지하수 상태에 관한 평가 항목인 Jw는 Table 2와 같다.

Q분류법은 RMR과 달리 하나의 정량적 평가요소와 정성적 평가요소가 결합되어 Jw를 선정할 수 있게 되어 있다. 그러나 절리수압을 측정할 수 없는 경우에는 A.의 경우와 같이 건조 혹은 5 l/m이하 소량이 유출되는 경우를 제외하고 다분히 정성적인 평가를 수행할 수밖에 없다. 터널 공사중 절리 수압을 측정하기 위해서는 water carrying main joint 방향성을 가로지르는 배수공

Table 1. Groundwater condition in RMR Rock Mass Classification (After Bieniawski, 1989).

Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/min, l/hr)		-	< 10 (600)	10~25 (600~1500)	25~125 (1500~7500)	> 125 (> 7500)
	(Joint water pressure)/(Major principal stress, σ_t, σ)		0	< 0.1	0.1~0.2	0.2~0.5	> 0.5
	General condition	1989 ver.	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing
		1976 ver.	Completely dry		Moist only	Water under moderate pressure	Severe water problem
	Rating	1989	15	10	7	4	0
1976		10		7	4	0	

Table 2. Groundwater reduction factor, Jw in Q Rock Mass Classification (After Barton et al., 1974).

Description	Jw	approx. water pressure (kgf/cm ²)	Note
A. Dry excavation or minor inflow i.e. < 5 l/m locally	1.0	< 1.0	1. Factors C to F are crude estimates; increase Jw if drainage installed 2. Special problems caused by ice formation are not considered.
B. Medium inflow or pressure, occasional outwash of joint fillings	0.66	1.0~2.5	
C. Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	0.5	2.5~10.0	
D. Large inflow or high pressure	0.33	2.5~10.0	
E. Exceptionally high inflow or pressure at blasting, decaying with time	0.2~0.1	> 10	
F. Exceptionally high inflow or pressure	0.1~0.05	> 10	

내 packer를 설치하여 측정이 가능하다. 그러나 설계 조사단계에서는 시추공내 packer test를 수행한다 하더라도 터널이 굴착되어 발생하는 터널 주변 특히 터널 상단 4D 이내의 수리경사(Hydraulic gradient)를 simulation할 수 없기 때문에 정확한 측정이 불가능하다.

대부분의 경암반 터널에서 수두 25 m이상 대규모 수압이 작용하는 경우는 특수한 개소를 제외하고 드물며, A. 혹은 B.로 평가 되는게 일반적이다. 따라서 특수조건을 제외하고 오히려 RMR에 비해 J_w 선정이 용이할 수도 있다. 참고로 공동 상부에 수벽터널(Water curtain tunnel)을 굴착하고 수많은 수벽공을 설치하는 LPG 지하 저장공동의 경우에도 공동 상부에 12 kgf/cm^2 이 작용하는 정도로서 위의 C., D., E., F의 수압 수준을 짐작할 수 있다.

터널 설계 조사단계에서 시추코어 및 시추공 영상촬영을 통한 절리특성 평가 및 지하수 유동 평가를 통해 RMR 지하수조건을 평가하는 기존의 일반적인 방법은 다음과 같다. 지하수위 상부나 지하수 흔적이 전혀 없는 부위에 대해서는 지하수 조건을 Dry로 평가하며, 지하수위 이하에서는 몇 가지 방법을 사용하고 있다. 시추공 영상촬영이 수행된 경우나 시추코어가 존재하는 경우에는, 절리빈도, 절리간격, 절리틈새를 고려하여 평가자가 지표지질 조사 결과와 연계(지표지질 조사 경험에 근거하여) Damp와 Wet으로 판정하며, 공내 지하수 용출이 많거나 적당한 수압이 작용할 곳이라 예상되는 부위에서는 Dripping을 판정하며 심각한 지하수 용출이 예상되는 부위에서는 Flowing으로 판정하고 있다. 혹자는 개구성(Open) 절리의 유량을 측정하여 평가하는 경우도 있으나, 터널 주변의 수리 경사를 모사하지 못하기 때문에 문제가 있다. 이렇듯 시추코어나 시추공 영상촬영 자료를 활용하는 경우에는 Bieniawski(1976)의 판정방법에 의존하는 것이 오히려 편리할 수 있다.

3. 대전LNG Pilot Cavern 수리지질 시험 및 지하수 유입량 평가

3.1 현장 개요

대전 LNG Pilot Cavern은 지하 동굴식 LNG 저장 공동의 실용화를 목적으로 SK건설, 프랑스 Geostock 및 SN Technigaz 3사가 공동연구중에 있는 Pilot Cavern이다. 현장은 한국지질자원연구원 부지내에 위치하고 있으며 저장공동의 형상은 폭 4 m, 높이 4 m (국부적으로 6 m)의 마제형 단면으로서 길이는 10 m이다. Fig. 1은 저장공동의 형상을 나타내는 3차원 도면으로서 맨 오른쪽의 공동이 저장공동으로 활용될 예정이다. 공동 천정은 지표로부터 약 20 m 하부에 위치하며 흑운모 화강암으로 이루어져 있다. Q분류법에 따른 암질 평가 결과 가장 빈번하게 나타나는 암질은 $Q = 12.5$ 의 양호한 암반으로서 암질의 범위는 2.3~26.4 (poor to good)로서 다양하게 나타나고 있다. 막장 및 터널벽면 절리 조사 결과 주 절리군의 특성은 Table 3과 같다.

Table 3과 같이 3개의 절리군이 나타나며 절리군 1에 해당하는 절리들이 가장 빈번하게 나타나고 있다. 그러나 절리군 1에 해당하는 절리들이 비록 소규모 단층이나 절리들이지만 절리 틈새 충전물이 많아 지하수 흐름을 크게 좌우하지 않고 있다. 오히려 Table 3과 같이 지하수 흐름을 결정적으로 좌우하는 N70E/20SE 방향의 개구성 절리가 공동 입구부터 대각으로 가로질러 막장까지 발달하고 있다. 이 절리는 Fig. 2의 공동 사진에서 쉽게 관찰 할 수 있다. Fig. 3에는 절리군 1과 개구성 절리 N70E/20SE를 모식적으로 표현하였다. 지표 지형의 경사가 NE방향에서 SW방향으로 낮아지는 형상을 나타내어 지하수 흐름이 NE에서 SW방향으로 흐를 것 같지만 공동 내부의 이러한 절리특성에 좌우되어 NW에서 SE방향으로 대부분의 지하수 흐름이 발생하는 것으로 관측되었다.

본 저장 공동은 실제 액화질소가스의 충전까지 주변 암반을 배수해야 하며 일련의 배수시스템을 구축하였다(Fig. 1 참조). 따라서 배수시스템 설치전후, 다양한

Table 3. Joint characteristics by joint survey on rock surfaces of Taejon LNG Pilot Cavern.

	Joint set 1	Joint set 2	Joint set 3	Water carrying main joint
Strike/dip	N71W/53SW	N45E/38NW	N8E/45SE	N70E/20SE
Mean spacing (cm)	41*	-	-	-
Mean persistency (cm)	210*	83*	75*	1000
Nature	Joint & Fault	Mostly joint	Mostly joint	Open joint

* The value was determined as a mean value following a log-normal distribution obtained by the statistical approach.

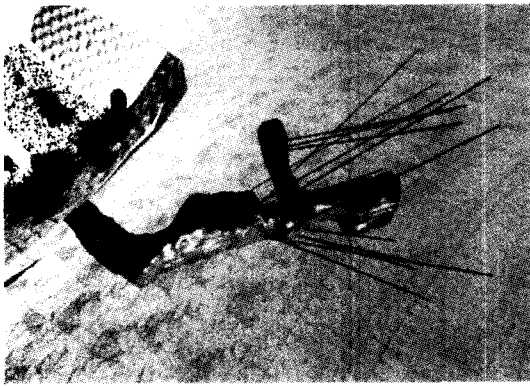


Fig. 1. Bird eye' view on Taejon LNG Pilot Cavern including the drainage holes.

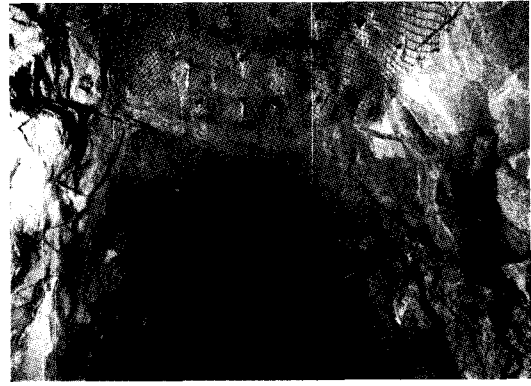


Fig. 2. A picture showing the main water carrying joint developed along with the cavern axis of Taejon LNG Pilot Cavern.

배수공에 대해 패커 시험(수압시험)이 이루어졌으며, 일련의 수리간섭시험(Hydrogeological interference test)로부터 주변 암반의 지하수 함유 능력, 배수공의 배수 효율성, 공동으로부터 지하수 유입량이 정밀한 프로그램에 따라 평가되었다. 수리간섭시험의 프로그램은 다음과 같다.

- Phase 1 : 모든 배수공을 물로 채워 잠그고 공동 유입량이 안정화 될 때까지 지표 관측공 지하수위, 공동 유입량 측정.
- Phase 2 : 일부 배수공에 대해 배수를 수행하며 공동 유입량이 안정화 될 때까지 지표 관측공 지하수위, 공동 유입량, 배수공 배수량 측정.
- Phase 3 : 모든 배수공에 대해 배수를 수행하며 공동 유입량이 안정화 될 때까지 지표 관측공 지하수위, 공동 유입량, 배수공 배수량 측정.
- Phase 4 : 지상 주수공(Recharge hole)을 통해 최대 1 bar 압력으로 주수하며 공동 유입량이 안정화 될 때까지 지표 관측공 지하수위, 공동 유입량, 배수공 배수량 측정

총 10일동안 수리시험이 24시간 중단없이 수행되었으며, 시험 종료 후에도 모든 측정은 지속되었다.

그 결과 측정된 지하수위, 절리수압, 공동 유입량, 누수 절리에서의 유입량 측정 등의 결과를 종합하였으며 지하수 조건의 평가 자료로 활용하였다.

3.2 수압시험 및 수리간섭시험 결과

본 수리지질 시험에서는 11공의 배수공에 대해서 평균 30 m 간격의 Single packer test를 시행하였고 4공

의 배수공에 대해서는 평균 10 m 간격으로 Double packer test를 시행하였다. Packer test 방법은 Lugeon 시험법을 채택하였고 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4의 시험결과에서 알수 있는 바와 같이 본 부지 암반의 투수성은 일반적인 작은 수리전도도를 갖는 경암 지반의 투수성 수준인 10^{-7} m/sec에 해당한다.

Fig. 4는 일련의 수리간섭시험의 결과로부터 각 시험 단계에 저장공동으로의 지하수 유입량 및 누수 절리 점(L1, L2, L3, L4)에서의 측정 지하수 유입량을 나타내고 있다. 각 시험단계의 종료는 유입량이 안정화되는

Table 4. Hydraulic conductivities of the surrounding rock obtained by Lugeon tests.

Drain hole	K from Lugeon test (m/sec)		Designation*
D1	2.50e-7	3.1e-7	upward hole in left
D2	7.43e-6	7.75e-6	upward hole in left
D3	8.68e-7	1.23e-6	upward hole in right
D4	9.25e-8		downward hole in right
D5	4.80e-7		upward hole in center
D6	7.77e-7		horizontal hole in right
D7	8.17e-7		downward hole in left
D8	7.45e-7		upward hole in left
D9	8.01e-7		downward hole in left
D10	8.71e-7		downward hole in center
D11	9.33e-7		downward hole in center
D12	8.10e-7		downward hole in center
D14	1.16e-7		upward hole crossing cavern
D15	3.11e-4		upward hole crossing cavern
D16	1.38e-6		upward hole crossing cavern

* It means the driving direction of the hole with respect to the cavern axis from the entrance.

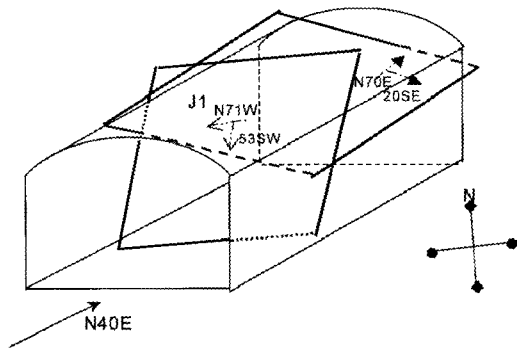


Fig. 3. Schematic diagram representing direction of Joint set 1 and a water carrying main joint.

시점을 기준으로 선정하였다. 지하수 유입량의 측정은 유량계(Flowmeter) 및 압력계를 설치하여 객관적인 자료 확보가 가능하였다.

3.3 지하수 유입량 측정 결과 및 직관적 관찰을 통한 지하수 조건 평가

RMR 지하수 조건 평가를 위한 여러 가지 방법을 사용하여 현장의 지하수 조건을 평가하였다.

가. 공동 유입량 평가

Fig. 4의 배수공을 통한 배수를 수행하지 않은 경우 Phase 1 및 Phase 4의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 각각 정상상태 평균 70 l/hr 및 200 l/hr의 공동 유입량을 나타내었다. 그럼에 나타내지는 않았지만 수리간섭 시험 이후 집중강우시 공동내 최대 유입량을 지속적으로 측정할 결과 최대 500 l/hr에 불과하였다.

따라서 본 공동의 길이가 10 m이므로, 어느 경우를 평가하더라도 Table 1에 따르면, 지하수 조건은 Damp 즉 평점 10에 해당함을 알 수 있다.

나. 절리수압/최대주응력비 평가

각종 배수공 및 관측공의 절리수압 측정결과와 평균 수두는 공동 천정으로부터 상부 4 m 정도로서 0.4 kgf/cm²의 절리수압을 나타내는 것으로 조사되었다. 최대주응력을 수직응력으로 평균 단위중량과 심도 20 m를 고려한 결과 절리수압에 대한 최대주응력의 비는 0.074로 평가되었다. 따라서 Table 1에 따르면, 지하수 조건은 Damp 즉 평점 10에 해당함을 알 수 있다.

다. 누수 절리 유입을 및 전반적 공동상태에 대한 정 성적 평가

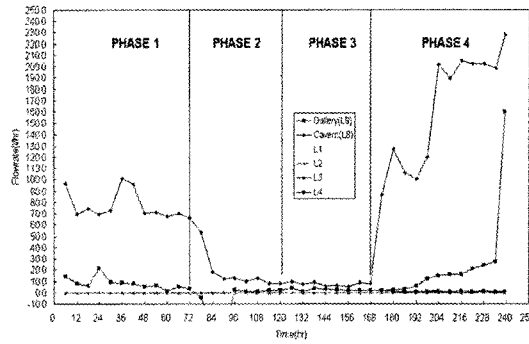


Fig. 4. Flow rate of Cavern and Leakage points inflows during the hydrogeological interference test between holes.

4개소의 누수절리들에서의 Seepage를 정성적으로 평가한 결과 dripping 혹은 Flowing으로 평가되어 위의 가. 및 나.의 경우와 상이한 평가가 이루어질 수밖에 없음을 알 수 있다. dripping 개소의 유량을 측정할 결과 평균 0.7 l/hr, flowing 개소의 유량을 측정할 결과 평균 37 l/hr로서 표 1의 터널 길이 10 m 당 유입량 평가방법과 비교하기 위하여 공동 표면적 161 m²를 곱한 결과 각각 113 및 5960 l/hr로서 damp 혹은 dripping 기준에 해당한다. 따라서 어떠한 방식을 취한다 하더라도 일관성이 부족함을 알 수 있다.

또한 공동 벽면의 전체적인 지하수 상태에 대한 평가를 정성적으로 수행하면 대부분의 암반벽면이 약간 젖어있다는 평가를 수행할 수 밖에 없어 Wet 즉 평점 7로 평가하였다.

4. 대전 LNG Pilot Cavern 지하수 유동해석

4.1 3차원 지하수 유동해석 결과

대전 LNG Pilot Cavern주위의 지하수 유동 현상을 다공질 매체를 가정한 연속체 모델로 수치해석하기 위하여 FEFLOW를 활용하였다. 본 프로그램은 포화/비포화 유동 모델이 가능하고 피압, 비피압, 다중 자유수면 대수층 모델 해석이 가능하다.

Fig. 5는 해석영역의 3차원 형상 및 지형 경사를 FEM 모델과 함께 나타낸 그림이고, Fig. 6은 정상상태의 지하수 포텐셜 및 지하수 유동 속도를 나타낸 것이다. 자세한 해석 절차, 경계조건 선정 절차 및 해석 결과에 대해서는 지면상 생략한다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 지하수 유동은 지형 경사의 영향으로 공동 우측에서 좌측으로 이루어지고, 유동 벡터의 크기 또한 공동 우측의 암반에서 훨씬 크다는

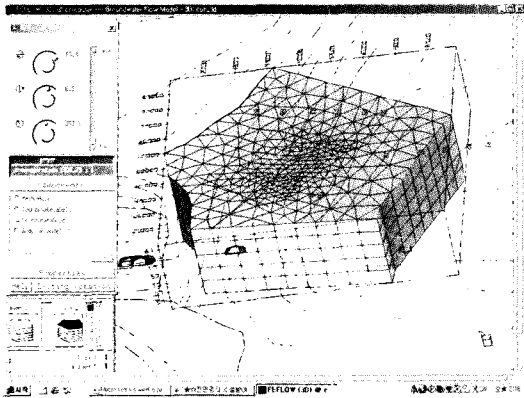


Fig. 5. FEFLOW groundwater flow model with geographical contour used in Taejon LNG Pilot Cavern.

것을 알 수 있다. 그러나 각종 수리지질학적 실험 결과 실제 공동은 Table 3 및 Fig. 3과 같은 절리조건의 영향으로 공동 좌측의 유동벡터가 훨씬 크고, 좌측의 암반의 투수성이 우측에 비해 상대적으로 양호하다. 이는 연속체 모델을 가정하는 경우에 발생할 수 있는 지하수 유동에 관한 일반적 왜곡 현상인 것으로 판단된다.

4.2 공동 유입량 평가

이러한 해석결과로부터 계산된 공동 유입량은 평균 45 l/hr로서 Table 1에 따르면 지하수 조건은 Damp 즉 평점 10에 해당됨을 알 수 있다.

5. 이론해에 근거한 대전 LNG Pilot Cavern 유입량 평가

5.1 Heuer(1995) 및 Raymer(2001) 예측법

터널 공사시 지하수 유입량을 추정하는 작업은 아무리 주의 깊게 수행한다 하더라도 상당히 어려운 일이다. 터널내로의 정상상태의 유입량을 계산하는 기본식이 Goodman, et al.(1965)에 의해 주어져 있지만, 사용된 여러 가지 가정으로 인하여 실제 적용하는데 많은 어려움을 나타내고 있다. 그 중에서도 수리전도도 모델은 만드는 방법에 따라 서로 다른 결과를 초래할 수 있어 가장 관건이 되는 항목이 된다.

Heuer(1995)는 경암 터널 자료를 분석하여 새로운 경험식을 주장하였는데, Goodman의 기본식에 의해 추정된 유입량을 단지 1/8로 감소시키면 가장 경험적인 근사치를 계산할 수 있다고 하였다. 이에 따르면 정상상태의 유입량 계산식은 다음과 같다.

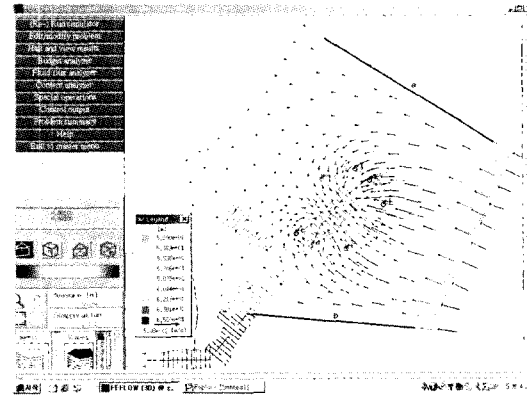


Fig. 6. Map of hydraulic potential and flow vectors around the Pilot Cavern.

$$Q_L = \frac{2\pi KH}{\ln(2z/r)} \times \frac{1}{8} \quad (1)$$

여기서 Q_L 은 터널 길이당 유입량, K 는 지반의 수리전도도, H 는 터널 상부 지하수두, z 는 터널 상부 포화암반의 두께, r 은 터널의 반지름이고, 1/8은 Heuer(1995)의 감소계수이다.

K 는 지하수 유입량에 선형적인 영향을 미치면서 지수함수적으로 변화하기 때문에, K 값은 통계적 분포 모델로서 추정하는 것이 가장 바람직하다. 단지 산술평균 및 기하평균으로 추정할 경우 발생할 수 있는 여러 가지 문제점에 대해 Raymer(2001)는 지적하면서 가장 바람직한 통계적 분포 모델 접근법을 제안하였다.

Raymer(2001)의 방법을 적용하는 절차는 다음과 같다. 수리전도도값을 오름차순 혹은 내림차순으로 정렬한 뒤, 각 값의 백분위값(Percentile)을 횡축에 나타내고 수리전도도값을 종축에 나타낸다. 대수정규분포의 평탄성을 확보하기 위하여 종축에 대해서는 Log를 취하고 횡축에 대해서는 각 백분위의 정규분포 누적함수값을 구하여 도식화하면 선형적 관계를 구할 수 있다. 구해진 선형적 관계를 선형함수로 근사시킴으로써 수리전도도 모델을 구할 수 있다. 결국 구해진 수리전도도 모델을 식 1에 대입함으로써 유입량 예측을 완성할 수 있다.

5.2 예측법의 적용 및 지하수 조건 평가

Table 4의 부지 전반에 관한 수리전도도 값을 근간으로 Heuer(1995) 예측법과 Raymer(2001) 방법을 사용한 결과는 아래와 같다.

터널 상부 포화암반의 두께는 14 m, 터널 반경은 2 m, 지하수두는 평균 수두인 4 m를 입력치로 결정하였다. Heuer(1995)방법을 적용하기 위해서 수리전도도의

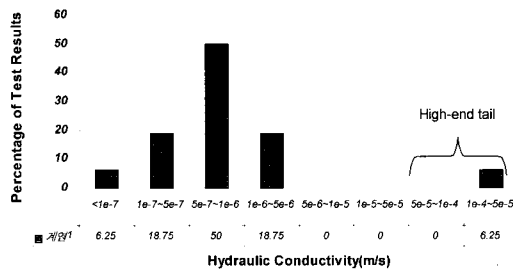


Fig. 7. Histogram of 18 packer-test results from Taejon LNG Pilot Cavern.

분포 경향을 Histogram으로 표시한 결과 Fig. 7과 같이 결정되었다. 그 결과 대전 LNG Pilot Cavern의 정상상태 지하수 유입량은 681 l/hr (11.4 l/min)로 결정되었다. 그러나 Heuer 방법을 사용한 결과 Fig. 7의 High-end tail부가 유입량 산정에 지나치게 큰 영향을 주어, High-end tail부를 제거하면 예측 지하수 유입량은 38.7 l/hr (0.65 l/min)로 크게 감소한다. 따라서 통계적 분포 모델을 사용하지 않으면 신뢰성 확보에 어려움을 갖는다는 것을 알 수 있다. Heuer(1995)방법을 사용한 결과 지하수 유입량은 681 l/hr (11.4 l/min)로서, 지하수 조건은 Wet 즉 평점 7에 해당된다.

Raymer(2001)의 방법에 따라 구한 수리전도도의 대수정규분포 모델은 Fig. 8과 같다. Fig. 8의 우측 이상값을 제외하고 직선식으로 구한 수리전도도 모델식은 다음과 같다.

$$K(m/sec) = m \sigma(P_i) + b \quad (2)$$

여기서 $\sigma(P_i)$ 는 백분위 P_i 의 정규분포 누적함수값이다. 그리고 중간 및 상한 예측량에 해당하는 수리전도도 모델 상수 m 과 b 및 그에 따른 예측량은 Table 5와 같다.

Table 5. Coefficient m and b of Equation (2), and the corresponding total inflow estimation (After Raymer, 2001).

	m	b	total inflow	
			l/min	l/hr
median model	0.426	-6.166	5.57	334
upper bound model	0.426	-5.902	10.23	614

따라서 Raymer(2001)에 따른 공동으로의 지하수 유입 예측량은 6 ± 4 l/min(330 ± 280 l/hr)로서, 지하수 조

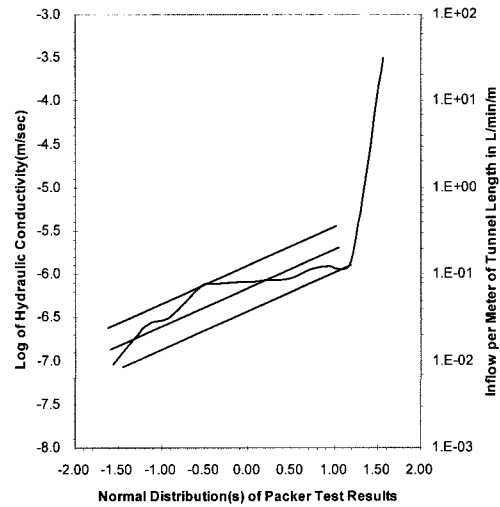


Fig. 8. Log-normal distribution of same test results as Fig. 7. Three parallel lines are graphically fitted upper bound, median, and lower bound correlations.

건은 상한치 예측량까지 고려하더라도 damp, 즉 평점 10에 해당함을 알 수 있다.

6. 종합 비교 및 제안

6.1 종합 비교

RMR분류법에 따른 지하수조건을 선정하기 위하여 다양한 방법을 사용하여 검토한 결과를 정리하면 Table 6과 같다.

Table 6과 같이 공동 유입량 측정 결과 지하수 조건은 정상상태에서 공동 상부 지반에 지하수위가 없는 경우 70 l/hr이고 공동 상부에 지하수위가 있는 경우 200 l/hr (집중강우시 500 l/hr)로서 Damp 즉 평점 10에 해당함을 알 수 있다.

공동상태에 대한 조사자의 직관적인 판단에 따라 평가할 경우 지하수 조건은 Wet으로서 실제 유입량 측정 결과와 다르며, 심지어 누수 절리에 대한 개별적인 판단을 수행할 경우 큰 오차를 보일 수 있음을 알 수 있다.

3차원 FEM 해석 결과 유입량으로부터 평가한 지하수 조건은 Damp로 평가되었지만, 실제 측정값의 64% 수준이었고, 강우에 의한 충전시 및 수두가 공동 상부 지반에 작용시의 유입량에 비해 매우 작았다. 따라서 다른 조건의 암반터널의 경우에는, 즉 Wet에 해당하는 암반조건의 경우 오차를 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

이론식에 의한 예측 결과 수리 전도도 통계 모델을 사용하는 Raymer(2001)의 방법이 측정된 실제 유입량

Table 6. Summary on the estimation results of groundwater by various evaluation methods.

Classification	Method	Result	Groundwater condition	
Monitoring and measurement	Monitoring of seepage inflow	70 l/hr or 200 l/hr (max. 500 l/hr)	Damp	10
	Joint water press./major principal σ	0.074	Damp	10
Qualitative evaluation	Water flowing condition at leaked points	Dripping or Flowing	Dripping or Flowing	4 or 0
	General water condition on walls	Wet	Wet	7
Estimation	3D Numerical analysis by FEFLOW	45 l/hr	Damp	10
	Heuer(1995)'s estimation	681 l/hr	Wet	7
	Raymer(2001)'s estimation	Median 330 l/hr upper bound 600 l/hr	Damp	10

과 매우 유사하였고, 예측 상한치는 실제 집중강우시 유입량과 매우 유사하였다.

불연속면에 대한 방향성을 제외하고, 지하수 조건을 고려하지 않은 경우 대전 LNG Pilot Cavern의 RMR은 53점으로 평가되었다. 지하수 조건을 고려하는 경우, 지하수 조건을 Damp로 판정하는 경우 총 63점으로서 Good rock II등급 암반으로 분류되며, Wet으로 판정하는 경우 60점으로서 Fair rock, III등급 암반으로 분류된다. 결국 지하수 조건에 대해 선정방법에 따라 다른 암반등급으로 분류될 수 있음을 쉽게 알 수 있다.

만약 Q분류법에 따른 지하수 감소계수 J_w 를 산정하고자 하는 경우, Table 6에서와 같이 실제 공동 유입량은 70 및 200 l/hr로서 각각 1.2 및 3.3 l/min에 해당하므로 $J_w=1$ 을 선정해야 한다. 3차원 수치해석 결과를 통해 선정하면 마찬가지로 $J_w=1$ 이다. Raymer(2001)에 따르면 5.5 l/min으로서 $J_w=0.66$ 을 선정해야 하나, 절리수압이 최대 수두 8 m 정도로 1.0 kgf/cm² 이내이고, 유입량이 기준인 5 l/min에 매우 근접하므로 마찬가지로 $J_w=1$ 을 선정할 수 있다.

결국 Q분류 J_w 값 선정에는 위의 모든 방법이 동일한 분류치에 속하므로 Q분류 자체가 낮은 투수성의 암반의 경우 RMR에 비해 지하수 영향의 미세한 편차를 고려하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

6.2 제언

본 논문에 대한 검토 결과는 대전 LNG Pilot Cavern에 대한 일례에 불과하지만, 다양한 평가방법을 시도하였고, 수리전도도가 10⁻⁷ m/sec 정도의 일반적인 경암반 터널 지반 투수성에 해당하므로 의미있는 결과를 산출한 것으로 판단된다.

그 결과 공동 상태에 대한 혹은 코어상태에 대한 직관적인 판단에 의존하는 지하수 조건 선정방법이 실제 결과와 상당히 다를 수 있다는 사실을 알 수 있었다. 무

엇보다, 통계적 수리전도도 모델을 사용하는 Raymer(2001) 예측방법으로도 실제 지하수 공동 유입량을 근사하게 예측할 수 있어, 암반의 지하수 조건 선정시 강력한 도구로서 사용할 수 있음을 알 수 있었다. 3차원 수치해석 결과 또한 어느 정도 합리적인 추정값을 산출하고 있었다. 그러나 지하수 유동모델링 해석에는 많은 시간이 소요되므로 항상 적절한 대안이 될 수 있는 것은 아니다. 절리수압 대비 최대주응력비 검토방법 또한 지하수 조건 선정에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 또한 알 수 있었다.

최근의 터널 설계 경향에 따르면 굴착 지반의 전반적인 투수성을 얻기 위하여 시추공에 대한 많은 수압시험을 시행하고 있어, 기왕에 얻은 자료를 바탕으로 Raymer(2001)방법을 적용한다면, 시간이 크게 지체되는 3차원 해석 이전에 암반분류시 빠르게 지하수 조건을 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

물론 터널 설계 조사단계에서 시추공 수의 제약, 그에 따른 시험 자료의 부족, 시추코어에 대한 암반분류시 심도 구간별 RMR분류를 세분화하는 일반적인 경향에 비추어 Raymer(2001)방법을 적용하는데 한계가 있을 수 있다. 그러나 모든 시추코어에 대해 이 방법을 사용할 필요 없이, 터널 계획심도 근처에서 5회 이상의 충분한 시험을 수행하거나, 몇 개의 시추공을 하나의 수리 지질학적 균질 영역으로 분류할 수 있다면 터널 계획심도 근처에서의 RMR 분류시에 특정하여 사용하는 것도 바람직 할 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J.(1974), Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mech. 6(4), 189-239.
2. Bieniawski, Z.T.(1989), Engineering rock mass classifications, New York: Wiley.

- 3. Goodman, R., D. Moye, A. Schalkwyk, and I. Javendel (1965), Groundwater inflow during tunnel driving, Engineering Geology 2:39.
- 4. Heuer, R. E.(1995), Estimating rock tunnel water inflow, Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, June 18-21, 1995.41.
- 5. Raymer, J. H.(2001), Predicting Groundwater Inflow into Hard-Rock Tunnels: Estimating the High-End of the Permeability Distribution, in 2001 Proceedings: Rapid Excavation and Tunneling Conference, edited by W. H. Hansmire and I. Michael Gowring, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2001.
- 6. SK Engineering & Construction, Geostock, SN Technigaz (2002), Fracture characterization from CSI results(TAE/R/D/1005A), TAEJON Pilot LNG Cavern.

이 대 혁



1991년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1993년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 02-3700-8644
E-mail: dhlee-d@skec.co.kr
현재 SK건설(주) Geotask팀 과장

이 철 욱



1992년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1994년 한양대학교 대학원 자원공학과
공학석사
Tel: 02-3700-7492
E-mail: cwlee-a@skec.co.kr
현재 SK건설(주) Geotask팀 과장

김 호 영



1980년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1982년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 02-3700-7481
E-mail: hykim-d@skec.co.kr
현재 SK건설(주) Geotask팀장