

균열암반에서의 양수시험자료 해석과 일반 방사상 유동모델의 적용성 연구

성현정¹ · 김용제¹ · 이철우¹ · 김구영¹ · 우남철^{2*}

¹한국지질자원연구원, ²연세대학교 지구시스템학과

Analysis of Aquifer Test Data in Fractured Aquifers and the Application of the Generalized Radial Flow

Hyeonjeong Seong, Yongje Kim, Chul-Woo Lee, Kue-Young Kim and Nam-Chil Woo

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Dept. of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

Data from 122 pumping tests were obtained from 100 boreholes in granites, volcanic rocks, metamorphic rocks, and Cretaceous and Tertiary sedimentary rocks, and then were analyzed using AQTESOLV. Results from 86 of the 122 tests (71%) have an analytical solution corresponding to Theis (1935), Cooper-Jacob (1946), Papadopulos-Cooper (1967), Hantush (1962), Moench (1985), or Hantush-Jacob (1955), whereas the remaining 36 results (29.5%) do not correspond to any of the analytical methods. Of the 86 results, only 17 match the Theis and Cooper-Jacob methods, indicating that the basic methods for pumping test analysis are useful for only 14% of the total data. This suggests that analytical solutions derived using leaky boundary conditions are appropriate for the analysis of pumping test data in fractured aquifers in this study. Furthermore, the results show the importance of carefully selecting an appropriate model for the analysis of pumping test data. Results from the 122 pumping tests were also analyzed using the GRF model. Using the Barker method, the results show that 77 of the 122 tests (63%) have dimensions ranging between 1.1-2.9. Of these 77 solutions, 39(44.2%) have a fractional dimension of 1.1-1.9, 26(6.5%) show 2-dimensional radial flow also applicable to the Theis method, and 38(49.3%) have dimensions of 2.1-2.9. The results show that groundwater flows according to a fractional flow dimension in fractured aquifers.

Key words : fractured aquifer, analytical solution, generalized radial flow (GRF model), fractional flow dimension

이 연구는 양수시험 해석해(Theis, 1935; Cooper-Jacob, 1946; Papadopulos-Cooper, 1967; Hantush, 1962a,b; Moench, 1985; Hantush-Jacob, 1955) 및 일반 방사상 유동 모델을 이용하여 우리나라의 균열암반 대수층(화강암, 화산암, 변성암, 백악기퇴적암, 제3기 퇴적암에 굴착된 100개 조사공)에서 수행되었던 양수시험으로부터 얻은 122개의 양수시험자료(수위강하 자료)를 분석하여 종합한 것이다. AQTESOLV 전산프로그램을 이용한 양수시험자료 분석에 의하면, 122개 자료중 86개(71%)의 자료들이 이 연구에 사용된 해석해와 일치하며, 양수시험자료 해석해 중에 누수(leaky) 및 경계조건(boundary condition)을 고려한 해석해들이 53개(43%)로 가장 많이 나타났다. 따라서, 양수시험자료의 해석은 균열암반 대수층의 수리지질학적 특성에 적합한 개념모델의 설정이 중요하다. 일반 방사상 유동(GRF)모델을 적용해보면, 122개의 자료 중 77개(63%)의 자료들이 Barker(1988)의 표준곡선에 의한 차원(1.1차원-2.9차원)을 보여준다. 이중 44.2%에 해당하는 39개 자료가 1.1차원과 1.9차원 사이의 실수 유동차원을 보여주는 반면에 26개(6.5%)만이 Theis 이론에 맞는 2차원의 방사상 흐름을 보여주며, 38개(49.3%)는 2.1차원에서 2.9차원에 속한다. 따라서 우리나라 균열암반 대수층에서 지하수 유동은 대부분 실수차원의 유동을 보여주는 것으로 평가된다.

주제어 : 균열암반, 해석해, 일반 방사상 유동(GRF)모델, 실수 유동차원

1. 서 론

양수 시험은 대수층의 수리상수를 구하기 위해서 널리

리 수행되는 수리시험이다. 대수층의 수리상수를 산출하기 위한 양수시험자료 분석에 이용되는 가장 기본적인 이론으로써 Theis 이론이 알려져 있다. Theis 이론

*Corresponding author: ncwoo@ysgeo.yonsei.ac.kr

에 의하면 지하수 유동은 2차원 방사상 유동이다. 그러나 1차공극으로 이루어진 충적층 대수층이나 사암과 같은 다공질 대수층과는 달리 기반암내에 발달되어 있는 대수층은 균열(fracture), 단층 등과 같은 2차 공극이 발달되어 있다. 따라서 균열 대수층내 지하수 유동은 이러한 2차 공극의 발달 상태에 지배된다. 2차원 유동뿐만 아니라 1차원 유동, 3차원 유동 또는 임의의 실수차원의 유동(예를 들면, 1.5차원, 1.8차원 또는 2.2차원 등)이 존재할 수 있다.

균열암반내 지하수 유동은 프랙탈 형태를 가지는 균열망에 지배를 받는다. Barker(1988)는 프랙탈 이론을 균열암반내 지하수 유동에 적용하고, 이를 일반 방사상 유동모델(Generalized radial-flow model; GRF model)이라고 하였으며, 그는 유동차원을 실수 차원(fractional dimension)까지 확장하였다. 그동안, 지하수 유동에 관한 프랙탈 모델은 많은 연구자들에 의해서 제안되었다(Barker, 1988; Hamm and Bidaux, 1994a, 1994b; 함세영, 1995). 모암반내 균열의 분포는 다양한 규모에도 불구하고 자기상사(self-similarity)의 성질을 가지고 있으며, 프랙탈 법칙에 따른다고 알려져 있다(Allegre *et al.*, 1982; Billaux, 1990; Velde *et al.*, 1991). 자기상사란 어떤 현상(여기서는 균열의 분포)이 작은 규모이든지 큰 규모이든지 같은 양상을 보인다는 것이다. 따라서 대수층에서 균열의 총 표면적은 규모에 비례하여 실수의 승수로서 증가한다. Hamm and Bidaux (1994a)는 반투수층으로부터의 누수현상을 포함하는 프랙탈 이론을 제안하였으며, 또한 정상류와 부정류의 이중공극 모델을 실수차원으로 확대시켰다(Hamm and Bidaux, 1994b).

균열암반내 지하수 유동은 공간적으로 불규칙하게 분포되어 있는 균열의 특성에 많은 영향을 받는다. 정확한 양수시험자료의 해석을 위해서는 균열암반내 지하수 유동의 특성을 이해해야 하며, 대수층의 수리특성을 결정하는데 이용되는 개념모델에 따라 해석해가 달라지므로 모델의 적용조건에 대한 신중한 검토가 필요하다. 이 연구는 우리나라 균열암반 대수층에서 얻은 양수시험자료를 지질별 특성에 따라 분류하고, 다양한 해석해 및 GRF 모델(Generalized Radial Flow Model)을 이용하여 균열암반 대수층의 수리특성을 해석·평가하고자 수행되었다.

2. 연구방법

화강암, 화산암, 변성암, 백악기퇴적암, 제3기 퇴적암

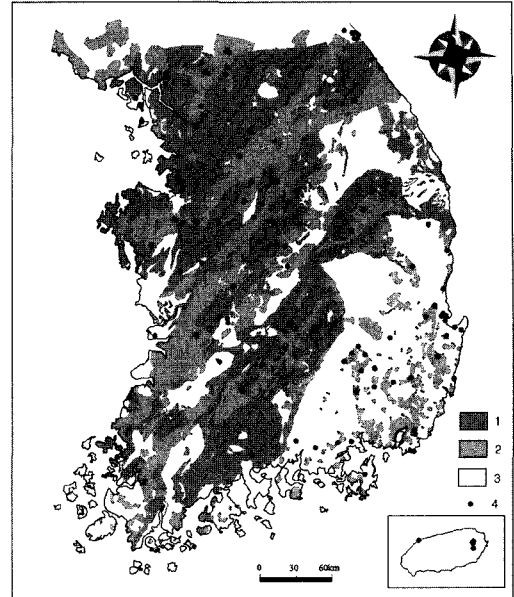


Fig. 1. A simplified geologic map and the locations of boreholes in the study area (1:Gneiss, 2: Granite, 3: Volcanic rock & Sedimentary rock, 4: Borehole).

의 100개 조사공(Fig. 1)을 대상으로 수행된 양수시험으로부터 얻은 총 122개의 양수시험자료를 분석 하였다. 균열암반 대수층을 대상으로 수행되었으며, 양수공의 심도는 400-1000 m의 범위를 보인다.

양수시험자료를 지질특성별로 분류한 후 AQTESOLV 전산프로그램의 양수시험 해석해(Theis, 1935; Cooper-Jacob, 1946(straight line); Moench, 1985(constant boundary)-Leaky; Moench, 1985(no flow boundary)-Leaky; Papadopulos-Cooper, 1967(Large Diameter); Hantush-Jacob, 1955(no storage in aquitard)-Leaky; Hantush, 1962a,b(Wedge-Shaped Aquifer))를 이용하여 양수시험자료에 의한 균열암반의 수리특성을 해석하고 GRF모델을 이용하여 실수 차원의 유동을 분석 하였다.

3. 대수층시험 자료해석의 배경

3.1. 개념적 배경

대수층의 물은 다공성 매질이나 파쇄대를 따라 분포한다. 이 같은 매질의 특성이 지하수의 투수능력을 결정한다. 순간수위변화(slug tests) 및 양수시험(pumping tests)은 현장에서 대수층의 수리특성(hydraulic property)을 구하기 위해서 널리 수행되는 수리시험이다. 양수시험은 일반적으로 한개 관정에서

양수하고 한개 이상의 관정에서 수위강하를 측정하여 투수계수(T)와 저류계수(S) 값과 같은 수리상수 (hydraulic parameter)를 산정하기 위해 수행된다.

수리시험을 통해 대수층의 수리상수를 결정하기 위한 많은 수학적 모델 및 그 해석해가 Theis(1935)에 의해 이론적 배경이 수립된 이후 많은 학자들에 의해 발전되어 왔으나, 대부분 다공질 대수층을 가정하고 있다 (Cooper and Jacob, 1946; Neuman, 1975; among many others). 일반적으로 균열암반 대수층은 풍화대, 균열망 및 주균열대로 구분할 수 있다(Verweij, 1995). 풍화대는 다공질매질로 간주할 수 있으며 이러한 대수층에서의 수리시험 해석은 기존의 많은 해석해 또는 표준곡선법으로 가능하다. 그러나 균열암반 대수층의 경우 기존의 해석해에서 전제하는 많은 가정들이 적합하지 않으며 이로 인해 수리시험 자료 해석에 어려운 점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Barker(1988)는 일반 방사상 유동모델(Generalized Radial Flow Model)을 통한 비정수차원에 대한 지하수 유동을 제안하였다.

이 연구와 같이 균열암반 대수층에서 수행한 수리시험으로부터 얻은 자료를 해석하려고 할 때 가장 중요한 것은 관심 대수층의 개념모델 설정이다. 개념모델을 어떻게 설정하느냐에 따라 해석해 혹은 방법이 달라지기 때문이다. 균열암반 대수층에 대한 개념적 모델로는 다공성 매질, 이중공극모델(dual porosity system), 분리균열망 모델(discrete fracture network) 등이 있다. 이들은 매질의 불균질성(heterogeneity)을 나타내는 방식에 차이가 있다. 이중공극모델이나 분리균열망모델은 균열암반내 지하수 유동을 보다 물리적 현실에 가깝게 모의할 수 있다는 장점이 있는 반면 현장에서 정확히 측정하기 어려운 균열에 대한 다양한 정보를 입력변수로 한다는 단점이 있다. 그래서 많은 경우 균열암반내 지하수 유동에 대해서도 다공성 매질 접근법을 채택하고 있다(Berkowitz *et al.*, 1988). 물론, 균열암반에 대한 다공성 매질 접근법은 여러 가지 전제조건을 만족시킬 때만이 유효하다. 이러한 전제조건은

균열의 밀도, 방향, 관심규모, 연구목적에 주로 관계한다(Berkowitz *et al.*, 1988; Gernand and Heidtman, 1997).

대수층 시험분석 방법은 대수층 형태와 수리조건에 따라 정류 상태, 피압·부정류상태, 자유면·부정류상태, 파쇄매체·부정류 등으로 구분된다. 정류상태의 해석하는 자유면 대수층과 피압대수층의 해로 나타내며 피압·부정류상태의 해석하는 피압대수층과 누수피압대수층의 해로 나타낸다. 이 연구에서 조사공에 적용한 해석하는 피압·부정류상태의 해석해로서 피압대수층과 누수피압대수층의 해를 구하는데 이용된다. 해석해에 대한 부분요약과 개념모델의 분류는 Table 1과 같다.

3.2. 피압대수층에서의 해석해

이 연구에서는 피압대수층의 해석해로 Theis(1935)식, Cooper-Jacob(1946)식, Papadopulos-Cooper(1967)식, 그리고 썸기형태의 대수층(Wedge-Shaped Aquifer)에서 Hantush(1962a, b)의 해석해를 적용하였다.

대수층의 수리상수를 산출하기 위한 양수시험자료 해석에 이용되는 가장 기본적인 이론이며, 피압대수층내의 부정류에 의한 수위강하 효과에 관한 최초의 수학적 분석은 Theis(1935)에 의해서 발표되었다. 국내에서 지하수 채수를 위하여 시추되는 굴착공은 주로 균열암반내에 굴착되어 있다. 따라서 암반대수층에서 양수시험을 실시할 경우 양수시험자료 해석에 근본적으로 균질의 다공질 매질 대수층에 적용 가능한 Theis(1935)식이나 Cooper-Jacob(1946)식을 이용하고 있다. 그러나 균열암반 대수층의 경우 기존의 해석해에서 전제하는 많은 가정들이 적합하지 않으며 이로 인해 수리시험 자료 해석에 어려운 점이 있다. 실제로 암반대수층에서 양수시험을 실시할 경우 Theis의 도해 방법과 Jacob의 직선식으로 해석하기가 어려운 경우가 종종 발생한다. 이 원인은 Theis가 가정한 대수층과 균열 암반에서의 대수층 특성이 다르기 때문이다. Papadopulos-Cooper의 해는 대수층이 피압상태하에 있

Table 1. Selected conceptual models for interpreting pumping test data.

Flow condition	Aquifer type	Aquitard leakage	Aquitard storage	Well storage	Partial well penetration	Anisotropic properties	Reference
Transient	Confined	No	No	No	No	No	Theis(1935)
Transient	Confined	Yes	No	No	No	No	Hantush and Jacob (1955)
Transient	Confined	Yes	Yes	No	No	No	Hantush (1964)
Transient	Confined	No	No	No	Yes	Yes	Hantush (1964)
Transient	Confined	Yes	No	No	Yes	Yes	Hantush (1964)
Transient	Confined	No	No	Yes	No	No	Papadopulos and Cooper (1967)

으며 Theis의 기본가정에 기존 양수정 내에 들어있는 지하수의 우물저류효과를 고려한 해석해이다. Hantush의 해는 피압대수층의 썸기형태(wedge-shaped) 내 지하수면 수위강하를 고려한 해석해로서 Theis의 기본가정에 대수층의 두께가 지수 함수적으로 변화하며, 유동 방향내 대수층 두께의 변화비가 0.2를 초과하지 않는 경우에 적용한다($\frac{db}{dx} < 0.20$).

3.3. 누수피압대수층에서의 해석해

조사공에 적용한 누수피압대수층의 해석해로 Hantush-Jacob(1955)(no storage in aquitard)누수, Moench(1985)(constant boundary)누수, Moench(1985)(no flow boundary)누수의 해석해를 적용하였다. 누수피압대수층의 개념모델은 압층에서 저유량의 변화는 없고(압층 내에 들어 있는 지하수는 배출되지 않고), 등방이며 누수피압대수층에 설치한 완전관통정에서 일정채수율로 지하수를 채수할 경우 적용되는 부정류 방사상흐름모델이다.

Hantush-Jacob(1955)의 해는 Theis의 가정에 대수층의 상위층인 자유면 대수층은 공급층(source bed)의 역할을 하며 하위층은 저투수성 지층(aquiclude)으로 구성되어 있고 압층(aquitard)은 양수시험기간 압층 내에 저유되어 있던 지하수는 배수되지 않고 공급층의 지하수를 하위대수층으로 누수 시키는 통로역할만 한다는 가정 하에 해석해를 구하는 방법이며, Moench의 해는 누수피압대수층에서 압층과 wellbore skin을 고려한 해석해로서 압층은 고정수두 경계(constant boundary) 또는 무흐름 경계(no flow boundary)가 상위층 또는 하위층에 놓여 있는 것을 가정한다.

3.4. 일반 방사상 모델(GRF Model)

암반내 균열의 분포는 여러 가지 다양한 규모에도

불구하고 자기상사(self-similar)의 성질을 가지고 있으며, 프랙탈 법칙에 따른다는 것이 알려져 있다(Allegre et al., 1982; Billaux, 1990; Velde et al., 1991). 프랙탈 이론의 기본원리는 어떤 현상(여기서는 균열의 분포)이 작은 규모이든지 큰 규모이든 같은 양상을 보인다는 것이다. 따라서 균열암반에서 균열의 총 표면적은 규모에 비례하여 실수의 승수로서 증가한다.

균열암반내 지하수 유동은 프랙탈 형태(fractal geometry)를 가지는 균열 망에 지배를 받는다. Barker(1988)는 프랙탈 이론을 균열암반내 지하수 유동에 적용하였으며, 이를 일반 방사상 유동모델(generalized radial flow model)이라고 하였으며, 유동 차원을 실수 차원(fractional dimension)까지 확장하였다. 그러나 이 모델은 비정수차원에 대한 유동모델을 개념화하기 어려운 점과 수리상수 K_f 및 S_f 를 독립적으로 산정할 수 없으며, $K_f b^{3-n}$ 및 $S_f b^{3-n}$ 와 같이 대수층의 기하학적 모형을 나타내는 값인 b^{3-n} 와 함께 표현되는 단점이 있다.

4. 해석해를 이용한 양수시험자료 해석

4.1. 양수시험 결과에 적합한 해석해

이 연구에서 사용한 균열암반 대수층에 대한 양수시험 해석모델은 Theis(1935), Cooper-Jacob(1946), Papadopolos-Cooper(1967), Hantush(1962a,b), 누수피압대수층의 해석해인 Moench(1985), Hantush-Jacob(1955)이다.

조사공의 양수시험자료 해석시 100개 지역의 122개 자료중 86(71%)개의 자료들이 이 연구에 사용한 해석해와 일치 하였다(Table 2). Table 2는 양수시험자료에서 해석해중 시간-수위강하곡선과 해석해의 표준곡선이 가장 잘 일치했을때의 해석해를 나타내었다. 이중

Table 2. Distribution of solutions.

Number of data	Solutions	Bedrock types				
		Granite	Volcanic rock	Metamorphic rock	Neogene sedimentary rock	Cretaceous sedimentary rock
25	Hantush-Jacob(Leaky)	17	2	2	1	3
17	Theis	6	2	5	1	3
16	Moench (constant-boundary)Leaky	6	4	1	1	4
12	Moench (no flow boundary)Leaky	4	1	2	-	5
5	Papadopolos-Cooper	1	-	4	-	-
11	Hantush (Wedge-Shaped Aquifer)	8	1	1	1	-
36	Disagreement	22	5	2	3	4

17개(14%)의 자료만이 Theis(1935) 방법과 Cooper-Jacob(1946) 법에 일치하며 69개(57%)의 자료들은 다른 해석해와 일치하였다. 예를 들면, Fig. 2는 조사공 중 하나인 상주(평온)지역의 시간-수위강하곡선으로 Theis의 표준곡선이 일치하는 경우이며, Fig. 3(a)는 조사공 중 하나인 이천(미란다2)지역의 시간-수위강하곡선과 Theis의 표준곡선이 일치하지 않는 자료를 나타내며, 이 지역은 누수피압대수층의 Moench(고정수두 경계)의 해와 일치하였다(Fig. 3(b)).

누수피압대수층의 해석해인 Hantush-Jacob(1955) 방법이 122개의 양수시험자료 중 25개(20%) 자료에 적합한 해로 나타났으며, 또한 어느 해석해와도 일치하지 않는 자료들도 36개(29.5%)나 보인다. 양수시험 자료의 해석에 이용되는 가장 기본적인 해석해인 Theis(1935)

방법은 전체 양수자료의 14%인 17개의 자료가 일치하며, 누수피압대수층의 Moench(1985)의 해석해 중 고정수두 경계(constant-boundary)의 경우 16개의 자료인 13.1%를 보이며, 무흐름 경계(no flow boundary)는 12개의 자료인 9.8%, Papadopulos-Cooper(1967)의 해석해는 5개의 자료인 4.1%, Hantush (1962a,b)는 11개의 자료인 9%가 일치한다. 해석해 중 누수상태를 고려한 방법들은 전체 양수자료 중 53개의 자료인 43%를 나타낸다. 이 연구에서 해석해들을 통하여 양수시험 자료를 해석하였을 때 누수 및 경계조건을 고려한 해석해들이 많이 나타났다.

4.2. 양수시험 결과에 대한 복수해석해의 존재
 해석해와 일치하는 86개의 자료 중 40.4%에 해당하는 36개의 자료가 복수해석해를 나타낸다(Table 3). 썬

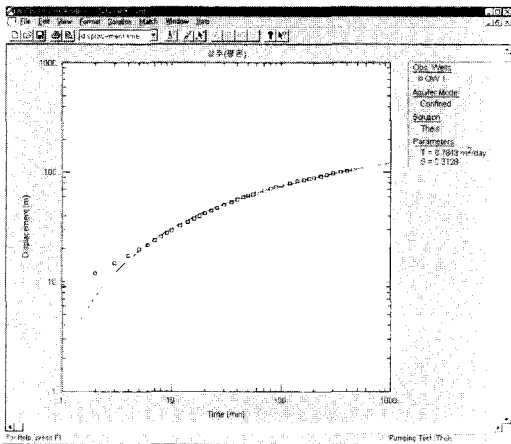
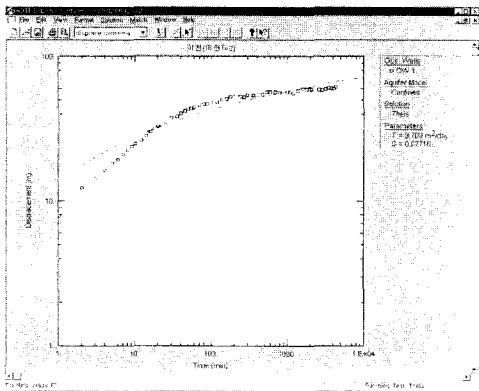


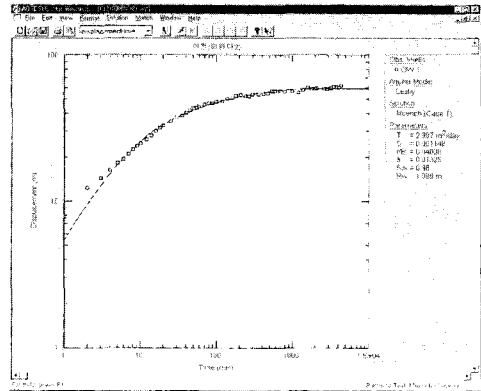
Fig. 2. An example of displacement-time curve showing a good agreement with Theis solution in Sangju area.

Table 3. Examples of duplication check with solutions.

Solutions	Number of data
Theis and Hantush-Jacob	5
Papadopulos-Cooper and Moench(constant-boundary)-Leaky	2
Hantush(Wedge-shaped aquifer) and Hantush-Jacob(Leaky)	23
Theis and Moench(constant-boundary)-Leaky	1
Theis and Moench(no flow boundary)Leaky	1
Theis and Hantush(Wedge-shaped aquifer)	3
Hantush(Wedge-shaped aquifer) and Moench(constant-boundary)-Leaky	1

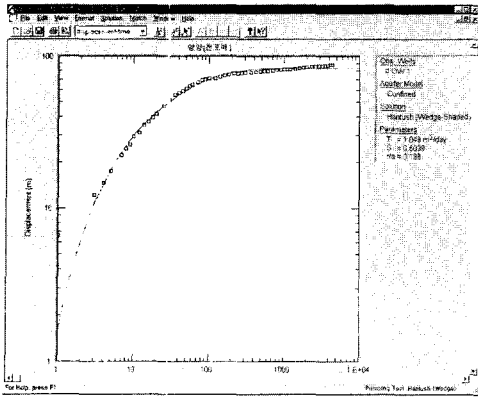


(a)

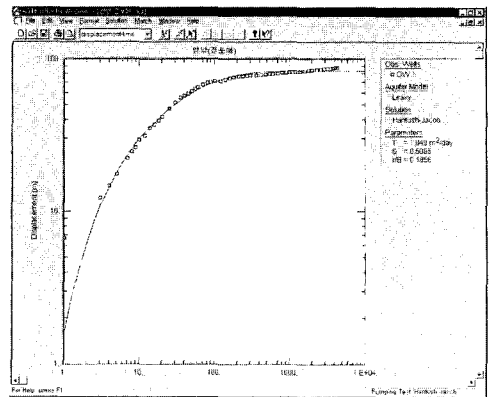


(b)

Fig. 3. An example of displacement-time curve showing (a) an inconsistency with Theis solution and (b) a good agreement with Moench solution in Echeon area.



(a)



(b)

Fig. 4. An example showing a duplication with two different solutions in Yangyang area (a) Hantush(Wedge-shaped aquifer) solution and (b) Hantush-Jacob(Leaky) solution.

Table 4. Transmissivity estimates from pumping tests (T is in m²/day).

Statistics	Pumping Test	
	Hantush (Wedge-shaped aquifer)	Hantush-Jacob (Leaky aquifer)
Number of data	23	
Geometric mean T	1.27	1.41
Average ln T	0.2404	0.3411
Minimum ln T	-3.892	-1.589
Maximum ln T	1.7157	1.7155
Standard deviation of ln T	1.1771	0.8673

기형태(Wedge-shaped)와 누수 대수층 형태(Leaky aquifer type)의 해석해 특성곡선이 비슷하므로 가장 많이 중첩된다. Fig. 4는 조사공 중 하나인 양양(전포매)지역에서 Hantush의 쉘기형태(Wedge- Shaped)와 Hantush-Jacob(누수) 형태의 해석해가 적합하게 나타나는 것을 도시한 그림이다.

동일 균열암반대수층에서 실시한 양수시험자료 해석 결과 중 Hantush (쉘기형태의 대수층)와 Hantush-Jacob(누수)의 투수량계수값을 비교하였다(Table 4). 두 해석해의 투수량계수 통계분석 결과 시험을 통해 얻은 투수량계수 자료는 동일 평균 집단에 속한다고 할 수 있다. Hantush(쉘기형태의 대수층) 해석해 결과의 표준편차는 Hantush-Jacob(누수)의 결과 보다 크다. 이를 통해 볼 때 일회의 시험으로 얻은 투수량 계수값은 Hantush(쉘기형태의 대수층) 해석해일 경우가 평균에서 멀 가능성이 많다. 그러므로 보다 신뢰성 있는 수리상수 산정을 위해서는 다수의 시험을 수행해야 한다고 사료된다.

5. GRF 모델을 이용한 양수시험자료 해석

5.1. GRF 모델의 적용

시간에 따른 수위강하 곡선과 Barker(1988)의 표준곡선을 일치시켜 차원을 결정하였다(Fig. 5). 암반 대수층에서 양수시험을 실시할 경우 시간별 수위강하는 Theis curve에 일치하지 않는 경우가 많다. 예를 들어, Fig. 6(a)는 이 연구에 사용한 양수시험 해석해와 일치하지 않은 변성암 지역 조사공 중 하나인 화성(울암조)사공으로 Barker의 표준곡선에 일치시켰을 때 대수층의 차원은 Theis(1935)가 가정된 방사상 흐름을 보이는 2.0차원으로 나타났으며, Fig. 6(b)는 Barker의 표준곡선에 일치하지 않은 조사공 중 하나인 포천(산정 2) 조사공을 도시한 그림이다.

균열암반 대수층의 실수차원을 조사해 본 결과, 122개의 자료중 77개(63%)의 자료들이 Barker(1988)의 표준곡선에 의한 1.1차원에서 2.9차원을 보여준다. 이 중 44.2%에 해당하는 자료가 1.1차원과 1.9차원 사이의 실수 유동차원을 보여주는 반면에 6.5%만이 Theis

이론에 맞는 2차원의 방사상 흐름을 보이며, 2.1차원에서 2.9차원은 49.3%를 나타낸다(Table 5). 따라서 대부분의 국내 균열암반 지하수 유동은 실수차원의 유동을 보여주는 것이 확인 되었다. 프랙탈 모델은 균열망

의 프랙탈 분포성을 이용함으로써 다른 개념모델보다 더 자연 상태에 가깝게 균열암반 대수층을 모식화 할 수 있으며, 훨씬 간편하게 균열암반내 지하수 유동 특성을 밝힐 수 있다. n차원에 따라 만들어진 대수층 모형은 수학적인 식을 이용한 단순한 모형이므로 실제와 같다고 해석할 수 없지만 이 모형을 통해서, 시험공을 중심으로 하여 거리 r에 따른 지하수의 유입 단면적의 변화를 알 수 있으므로, 이를 토대로 또 다른 균열과의 연결성을 고려해야 한다.

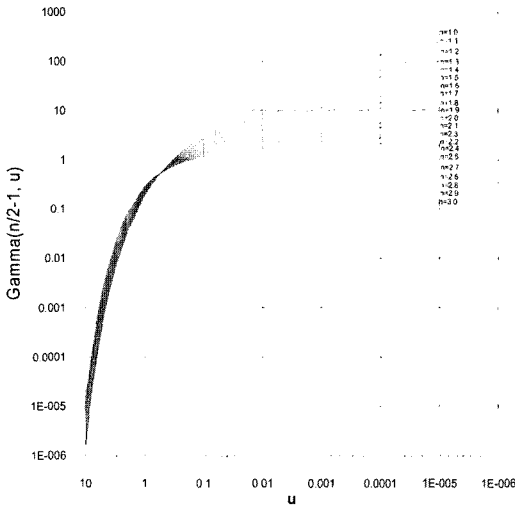


Fig. 5. Incomplete gamma funtion of the GRF model (Barker, 1988).

Table 5. Determined using Barker model.

Dimension	Number of data	Percents (%)
1.1-1.9	34	44.2
2	5	6.5
2.1-2.9	38	49.3

5.2. GRF 모델의 해석

122개의 자료중 77개(63%)의 자료들이 Barker (1988)의 표준곡선에 의한 차원을 보여주며 1.1차원에서 2.9차원을 보여준다. 차원을 결정할 수 없는 45개의 조사공들의 수위강하곡선을 살펴보면 대부분의 이중곡선 형태를 나타낸다. 이러한 형태는 경계조건(boundary condition), 누수(leaky), 이방성, 불균질성에 의한 영향으로 해석될 수 있다. 현재까지 많은 연구자들의 연구 결과로는 지질구조, 단층, 균열, 열극 등의 발달 및 분포상태에 따라서 실수 차원이 결정되며, 한 실수 차원의 한계는 양수정으로부터 수백 m인 것으로 추정된다(함세영, 1995).

양수시험 자료 중 어떤 것은 실수 차원이 시간적으로 변화함을 나타냈다. 이것은 균열의 공간적 발달상태에 따라 지하수 유동의 실수 차원이 변화하는 것을 시사한다. Fig. 7은 실수 유동 차원의 변화에 대한 모

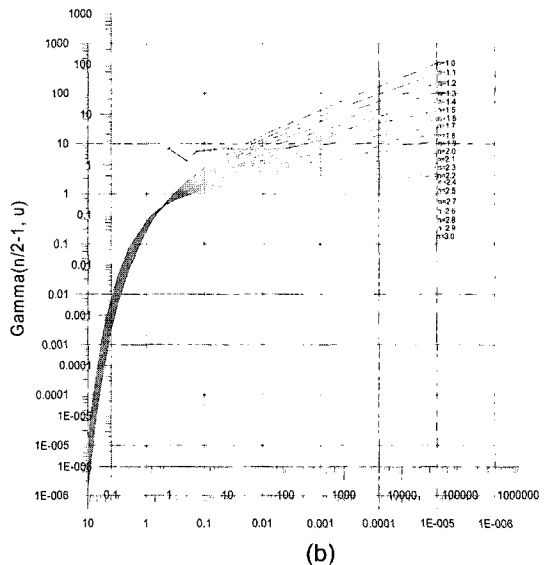
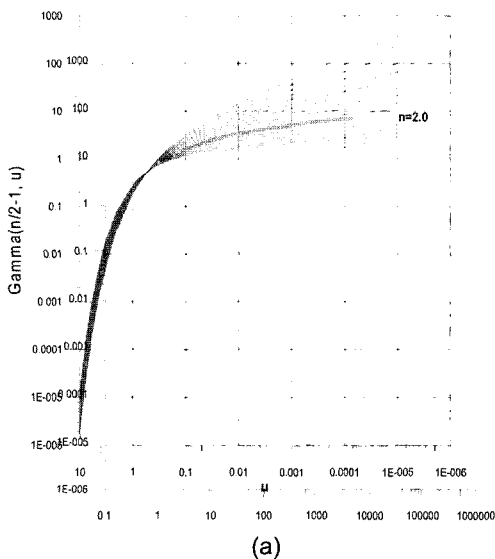


Fig. 6. Barker GRF model applied to the abstraction borehole in (a) Yulam area, yielding a flow dimension of 2.0 and (b) in Pohang area, showing an inconsistency with the model.

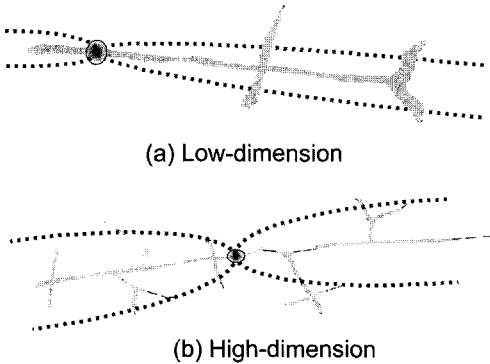


Fig. 7. Schematic presentation of change of flow dimension.

식도이다(이철우 등, 1999). Fig. 7(a)는 하나의 주요 균열이 미소 균열들 속에 존재하고 있는 경우이다. 이때는 시간의 경과에 따라 저차원으로부터 고차원으로 변화한다. Fig. 7(b)는 미소한 균질의 균열이 어떤 실수 차원의 균열대속에 한정되어 있는 경우이다.

저차원은 거리 r 에 따른 유입단면이 조금씩 넓어지므로 연결되어지는 균열의 수가 차원이 큰것에 비해 적다는 것을 의미하며, 따라서 방향성이 고려되어야 한다. 또한 이 대수층 모델은 균열의 밀도, 균열의 연결성 등을 내포하고 있으므로, 시추공의 코아 검층, 주변 지질구조 등을 함께 고려한다면 균열암반 대수층을 이해하는데 유용할 것으로 본다. 고차원의 대수층은 저차원의 대수층보다 거리 r 에 따른 지하수 유입면적이 넓으므로, 보다 많은 균열과 연결될 확률이 높다는 것을 의미하며, 결국 n 차원은 암반내에서 균열의 밀도와 비례하며 균열암반내에서 균열의 밀도, 이들간의 연결성 및 방향성에 대한 의미를 함축한다.

6. 결 론

지질특성별 균열암반 대수층의 수리특성을 해석·평가하기위해 양수시험 해석해 및 일반방사상 유동 모델을 적용하여 양수시험자료를 분석하였다. 100개 지역의 122개 양수시험자료중 89개의 자료들이 이 연구에 사용한 해석해로 해석이 가능하였으며, 자료 해석시 조사공들의 해석해들을 살펴보면 누수 및 경계조건을 고려한 해석해들이 많이 나타났다. 그러므로, 양수시험자료를 해석할 때에는 개념모델의 설정 및 누수, 고정수 두 경계, 무흐름 경계 등을 고려해야 한다.

GRF 모델의 적용에서 균열암반 대수층의 실수차원을 조사해 본 결과, 이 연구에서 분석한 균열암반 지

하수 유동은 실수차원의 유동을 보여주는 것으로 확인되었다. 122개 자료 중 6.5%만이 Theis 이론에 맞는 2차원의 방사상 흐름을 나타내므로 수리지질학적 특성을 고려하지 않은 채, 단순히 방사상 흐름을 적용하여 수리상수를 구하면 실제 상황과는 다른 오차를 범할 수 있다.

n 차원에 따라 만들어진 대수층 모형은 수학적인 식을 이용한 단순한 모형이므로 실제와 같다고 해석할 수 없지만 이 모형을 통해서, 시험공을 중심으로 하여 거리 r 에 따른 지하수의 유입 단면적의 변화를 알 수 있으므로, 이를 토대로 또 다른 균열과의 연결성을 고려해야 한다. 또한 이 대수층 모델은 균열의 조밀도(fracture density), 이방성에 따른 방향성 유무 및 균열의 연결성 등을 내포하고 있으므로, 시추공의 코아 검층, 주변의 지질구조 등을 함께 고려한다면 균열암반 대수층을 이해하는데 유용할 것으로 본다. 차원을 결정할 수 없는 45개 조사공들의 수위강하곡선을 살펴보면 대부분의 이중곡선 형태를 나타낸다. 이러한 형태는 경계조건, 누수, 이방성, 불균질성에 의한 영향도 충분히 고려해야 한다. 차원을 결정할 수 없는 조사공들에 대한 해석해를 살펴보면 누수 및 경계조건을 고려한 해석해와 대부분 일치하는 것으로 나타났다.

현장시험을 수행한 후 양수시험 해석을 위한 개념모델을 선정하기위해서는 기본적으로 수리지질학적 특성(이방성, 대수층의 형태 및 흐름 상태 등)과 주변 지질구조 등 충분한 사전조사가 이루어져야 하며, 양수시험 자료를 정확하게 해석하기 위해서는 균열암반 대수층에서 보다 많은 현장시험과 이론연구가 요구된다.

사 사

이 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-2-2)에 의해 수행되었으며, 논문의 세심한 검토를 해주신 정상용교수님과 이강근교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- 이철우, 함세영, 조성현 (1999) GRF 모델을 통한 대수층의 형태 연구. 대한지구 물리학회 제2차 정기총회 및 학술발표회, p. 22-24.
- 함세영 (1995) Hydraulic characteristics of fractured aquifers in south korea applying fractal models(I). Jour. Geol. Soc. Korea., 31(4), p. 467-482.
- Allegre, C.J., Le Mouel, J.L. and et Provost, A. (1982) Scaling rules in rock fractures and possible implications for earthquake prediction. Nature., 297, p. 47-

- 49.
- Barker, J.A. (1988) A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. *Water Resour. Res.*, 24(10), p. 1796-1804.
- Berkowitz, B., Bear, J. and Braester, C. (1988) Continuum model for contaminant transport in fractured porous formations. *Water Resour. Res.*, 24(3), p. 1225-1236.
- Billaux, D. (1990) Hydrogeologie des milieux fractures: geometric, connective et comportement hydraulique. These Doct, ENSMP, p. 277.
- Cooper, H.H. and Jacob, C.E. (1946) A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *American Geophysical Union Transaction.*, 27, p. 526-534.
- Gernand, J.D. and Heidtman, J.P. (1997) Detailed pumping tests to characterize a fractured bedrock aquifer. *Groundwater.*, 35(4), p. 632-637.
- Hamm, S-Y. and Bidaux, P. (1994a) Ecoulements transitoires en geometric fractale avec drainance : theorie et application, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 318, serie II., 2, p. 227-233.
- Hamm, S-Y. and Bidaux, P. (1994b) Stationary dual-porosity fractal model of groundwater flow in fractured aquifers. *The Jour. Eng. Geol.*, 4, p. 127-138.
- Hantush, M.S. and Jacob, C.E. (1955) Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Am. Geophys. Union Trans.*, 36, p. 95-100.
- Hantush, M.S. (1962b) Drawdown around a partially penetrating well. *Jour. of the Hyd. Div., Proc. of the Am. Soc. of Civil Eng.*, 87(HY4), p. 83-98.
- Hantush, M.S. (1962a) Flow of ground water in sands of nonuniform thickness, 3. Flow to wells. *Jour. Geophys. Res.*, 67(4), p. 1527-1534.
- Moench, A.F. (1985) Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers. *Water Resour. Res.*, 21(8), p. 1121-1131.
- Neuman, S.P. (1975) Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resour. Res.*, p. 329-342.
- Papadopulos, I.S. and Cooper, H.H. (1967) Drawdown in a well of large diameter. *Water Resour. Res.*, 3, p. 241-244.
- Theis, C.V. (1935) The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Am. Geophysical Union Transaction*, 16, p. 519-524.
- Velde, B., Dubois, J., Moore, D. and et Touchard, J. (1991) Fractal patterns of fractures in granite. *Earth and Planetary Science Letters*, 104, p. 25-35.