

# 추계학적 지표하 수문학의 현재와 미래에 관한 토론



정 일 문 | 선임연구원, 한국건설기술연구원 / imchung@kict.re.kr

## 1. 서언

최근 수자원관련 저널인 SERRA(Stochastic Environmental Research and Risk Assessment)에서 흥미로운 기사를 읽었다. 지난 20여 년간 장족의 발전을 일궈낸 추계학적 지표하 수문학(Stochastic Subsurface Hydrology)에 관한 토론내용이었는데 유체흐름과 비균질 매질에서의 용질 이동의 이해를 크게 증진시킨 분야임에는 누구나 긍정하지만, 그 정교한 이론과 접근 방식이 실제 문제에 적용됨에 있어서는 많은 제한이 있어왔다는 사실에 대한 날카로운 비판도 있었다. 토론은 다음과 같은 두 가지 질문에 대한 전문가들의 답변으로 진행되었다.

질문 1: 추계학적 이론과 접근방식은 비균질 매질내에서의 유체흐름과 용질이동에 관해서 그처럼 놀라운 진보를 거듭했음에도 불구하고, 실제 적용사례는 왜 많지 않은 것일까?

질문 2: 추계학적 이론과 접근방식을 수문지질학적 조사와 모델링에 일상적인 도구로 만들기 위해서는 어떤 점이 해결되어야 하는가?

앞의 두 가지 질문에 대해 9명의 저명한 관련 전문가들의 광범위한 토론이 이루어졌는데 기술적인 부분은 물론이거니와 사회적인 문제까지 제기되었다. 주

로 제기된 문제들을 살펴보면 다음과 같다(Zhang Y.-K. and D. Zhang, 2004).

- 추계학적 이론의 광범위한 적용이 부족한 것은 이론을 만드는데 사용된 단순화나 근사화에 따른 문제는 아닌가? 또는 이론을 적용하기 위한 적절한 자료군을 수집할 수 있는 능력의 한계때문인가?
- 교육과 훈련의 부족 혹은 연구집단 상호간의 소통부족, 방법론의 근본적인 문제점이 있는 것은 아닌가? 연구개발을 중요한 논점으로 부각시키는데 심각한 사회학적 문제가 있는 것은 아닌가?

추계학적 지표하 수문학 분야는 상대적으로 새로운 과학분야이다. 따라서 학문적으로 매우 중요하므로 문제점을 이해하고 그것을 해결하려는 노력은 대단히 중요하다. 따라서 제기된 질문에 대한 올바른 해답을 찾는 과정은 그 해답만큼이나 중요하다고 판단된다. 따라서 저명한 학자들의 정리된 답변을 통해 추계학적 지표하 수문학의 현재와 미래를 살펴보는 계기가 되었으면 한다.

## 2. 실제 공학적 응용에 있어서 추계학적 수문지질 모델링의 역할(Freeze, 2004)

이 견해는 지하수분야의 고전(古典)인 Groundwater (Freeze and Cherry, 1979)의 저자인 Freeze의 답

변내용이다. 그는 스스로 자신이 토론에 초대된 이유는 추계학적 수문지질학의 효시가 되는 그의 논문 (Freeze, 1975) 때문이라고 밝혔다. 논문을 쓸 당시 그는 뉴욕의 IBM Thomas J. Watson 연구센터에서 물리적 기반의 지하수 흐름 수치모형을 개발하고 있었는데 당시 다른 수문학자들과 마찬가지로 전적으로 확정론적인 모형으로 틀을 잡고 있었다고 한다. 우연히 옆 사무실에 있던 저명한 지표수문학자 Jim Wallis와 하천유량 시계열의 추계학적 특징에 관한 논의 도중 아이디어가 떠올라 지하수 모델링의 확정론적 특징에 추계학적 특징을 반영해보고자 했다는 것이다.

Freeze 자신은 연구를 수행하는 동안에도 추계학적인 영향(예, 투수계수의 변동에 따른 수두의 불확실성 등)은 절대 크지 않을 것이란 확신을 가졌었고, 불필요할 것이라는 추측까지 했었다고 한다. 결과적으로 이 논문은 아직까지도 이 분야에서는 참고문헌의 고전으로 인용되고 있다.

하지만 Freeze는 첫 번째 질문(광범위한 사용의 제한 여부)에 대해 조심스러운 접근을 펼쳤다. 지금 전 세계적으로 가장 큰 이슈가 되고 있는 지하수 오염 및 정화 부분에 있어서 대다수 관련자들은 추계학적 불확실성에 관한 결과에 있어서 민감한 반응을 보이고 있기 때문이라고 그는 밝혔다. 규제의 주체나 규제를 당하는 쪽 모두 비전문가 집단인데 문제가 발생했을 때 추계학적 모델링 결과를 제시하게 되면 결론이 더욱 모호해지는 상황으로 발전함으로써 공공업무 처리할 때 여러 가지 문제가 발생한다는 것이다. 결과적으로 모델링은 단순히 기술적인 활동이 아니라 경제적, 정치적, 법적, 사회적 목적에 부합해야 하며 이러한 목적은 당사자에 따라 달라질 수 있기에 더욱 조심스러워야 한다는 것이다. 또한 그는 추계학적 분석을 통한 불확실성 분석은 전체적인 목적을 달성할 때 종종 더욱 복잡하고 모호한 태도를 보이게 되는 단점이 있다고 지적했다.

한편, 불확실성이란 것은 그 자체로는 매우 성가신 존재일 수 있지만, 의사결정자의 입장에서 하나의 대안을 선택하는 과정이며 위험도 분석 또한 잠재적

인 위험을 줄일 수 있는 요소가 되기도 하므로 경제적으로도 큰 도움이 될 수 있다고 강조한다.

그는 기술적인 측면에서의 지적도 빼놓지 않았다. 특히 그는 매개변수에 의한 불확실성 뿐 아니라 개념적 모형을 설정할 때의 불확실성이 클 것에 대해서도 강조하며 공학자들의 주의를 당부했다.

또한 기술적인 면보다 더욱 큰 영향을 미치는 불확실성은 경제적인 면(프로젝트 예산이라는 한계, 이자율, 벌금 등 비용을 절감하려는 주체의 의지에 따른 불확실성), 법적인 불확실성(미래환경 규제의 변화, 소송가능성 등)이며 그중에서도 가장 큰 불확실성은 정치적인 면(정부의 변화)이라고 강조한다. Freeze의 마지막 코멘트에 귀 기울여 보자.

“예를 들어 오염물질이 백만분의 일의 확률로 관심 지역으로 유입될 것이라는 추계학적 모델링 결과가 나왔다고 합시다. 이같은 최악의 시나리오에 대해 비전문가 그룹은 ‘그걸 어떻게 확신하겠느냐’고 코웃음 치지 않았습니까. 게다가 그들의 목전에 이해관계가 있다면 뭔가를 보여주어야 하는 기술자들은 그야말로 백전백패일 것입니다. 따라서 과학자 그룹과 공학자 그룹이 머리를 맞댄 공동대응이야말로 연구자들이 마련해야 할 급선무입니다.”

### 3. 추계학적 수문학의 이슈에 관한 소견 (Sudicky, 2004)

워털루 대학의 지하수 전문가인 Sudicky 교수의 견해는 의외로 간단명료 했다. 실제적인 적용이 이뤄지지 않는데 대하여 그는 대다수의 연구기관과 대학원에서 추계학적 지표하 수문학 이론을 전문적으로 다루지 않기 때문이며 기본적인 지식(매개변수 통계학, kriging, Monte Carlo 분석 등)을 아는 대학원생들 뿐 아니라 교수들조차 각종 논문에서 발표되는 정교한 수학적 묘사 (Taylorian Lagrangian 접근법, spectral representation theorem, cumulant expansion methods, 스펙트럴 분석 등)는 이해하기 힘들기 때문에 실제 적용에 문제가 있다는 것이다. 그는 1986년

WRR(Water Resources Research)에 발표한 Borden 대수층 관련 논문에서 실제적인 적용을 성공적으로 수행한 바 있는데 그 이후 이 분야의 관련 논문은 주로 이론가들의 이론 논문이 현장의 적용논문을 크게 앞서고 있다며 은근히 전문가 집단을 꼬집었다.

특히, 이론 개발자들은 그들의 이론이 왜 현실에 유용한지를 아마추어나 문외한들도 이해할 수 있는 용어로 설명해야 하며, 이론을 사용 가능케 하는데 필요한 자료의 형식과 수에 대해서도 현장 연구가들이 납득할 수 있도록 제시해야 한다는 주장을 피력했다. 지표수문학자들은 추계학적 이론을 현실에 적용하는 일을 많이 한 반면 지표하 수문학에서는 이런 노력이 부족했다는 것이다. 또 법적인 측면에서도 문제가 많다고 했다. 예를 들면 대개의 규제는 단일값(예를 들면 최대 허용 농도)에 기반을 두고 있고 예측의 불확실성(예를 들면 초과확률)같은 것은 단속자들의 안중에 없다는 것도 실제 적용이 이루어지지 못한 중요한 이유라는 것이다.

#### 4. 추계학적 지표하 수문학 - 도전과 오해 (Rubin, 2004)

대표적인 추계학적 수문지질학자인 버클리 대학의 Y. Rubin교수의 견해는 위의 두 사람과는 달리 다소 강경한 추계론적 입장을 띄고 있었다. 실제 적용이 적었다는 데 대해 그는 많고 적음이라는 것은 매우 주관적일 수 있다고 했다. 그는 Christakos(1992)의 글을 인용하면서 서두를 연다.

“..추계학적 연구프로그램의 개발은 기존의 잘 정립된 접근방식의 단순한 연장으로 간주될 수 없는 지적인 경험으로서 새로운 개념과 통찰력있는 결론이 점차 대두될 것이다. 이같은 이해는 매우 천천히 이뤄질 것이다..(중략)”

그는 몇 가지 연구결과 (Weismann et al., 1999; Ritzi et al., 2004)를 예로 들어 지구통계학 모형을 지질학적 복잡성을 묘사하는 데 훨씬 더 숙련도 있게

활용한 노력이 있었다는 것을 강조한다. 또 Pinder 교수가 발표한 논문(Pinder and Sykes, 2003)을 예로 들어 미래를 전망한다. 논문에는 가까운 미래에는 지하수 분쟁관련 법정에서도 확률개념이 받아들여질 것이며, 다양한 확률정도에 따라 ‘가능한(possible)’과 ‘개연성있는(probable)’이라는 용어가 일반화될 것이라는 전망이 담겨 있다. 또 이러한 경향은 실행 담당자들이 추계학적 개념을 받아들일도록 큰 영향을 줄 것이라는 것이다.

그는 추계학적 패러다임의 채택이 느리고 빠른 것을 떠나 두 가지를 자문해보기를 제안한다.

“추계학적 패러다임의 빠른 채택을 막는 진정한 장벽은 무엇입니까? 적용이 느리다고 하여 추계학적 패러다임이 열등한 것이라고 할 수 있습니까?”

이 질문에 대한 답변의 열쇠는 두 가지 일반적인 오해를 명확하게 하는 데 있다고 그는 주장한다. 첫 번째 오해는 추계학적 패러다임과 확정론적인 패러다임이 반대선상에 있다고 보는 견해이다. 이에 대해 그는 추계학적 수문지질학은 기존의 수문지질학의 확정론적 접근방식을 크게 확장한 것이라고 변론한다. 간단히 말해서 확정론이야 말로 Dirac delta형식의 확률밀도함수에 지나지 않는다는 것이다. 나아가 추계학적 수문지질학은 이러한 연속성을 설명하는 형식론을 확립했다고 강조한다.

그가 제기하는 두 번째 오해는 추계학적 수문지질학이 실용적이지 않다는 견해이다. 즉, 지구통계학적 모형의 동정(identification)과 같은 부분에서 요구되는 엄청난 양의 자료를 구하기 어렵다고해서 추계학적 패러다임을 무시하고 확정론적 패러다임을 정당화하려고 해서는 안된다는 것이다. ‘실용적’이란 의미가 빠르고 임시방편적인 것으로 여겨져서는 안되며 오히려 분명하고 깊은 부분까지 통찰하는 것이 ‘실용’의 진정한 의미라는 것이다. 가용한 자료의 수가 적다고 하여 확정론적 접근법이 정당화되서는 안되며 추계학적인 분석의 논리마저 무시되서는 안된다는 것이다. 추계론은 가용자료수가 없을 때 불

확실성이 최대가 되며 관측오차가 없을 때 확정론으로 귀결되기 때문이라고 강변하기도 한다. 따라서 확정론은 추계론의 실질적인 대안이 될 수 없으며 자료의 부족문제는 관련된 불확실성을 모형화하는 것으로 해결해야 하며 궁극적으로 추계학적 패러다임이야말로 이러한 도전을 떠맡을 충분한 자격이 있다는 것이다.

두 번째 질문에 대한 그의 답변도 명료하다. 그는 최근 추계학적 개념을 실제 적용하기 위한 도구들이 개발되고 있다고 했다. 또한 지표화 수문학의 대학원 프로그램을 통해 여러 가지 형태의 강의를 개설되고 인터넷의 발달을 통해 정보가 공유될 수 있다는 것이다. 일상적인 응용프로그램을 개발하려는 도전이 추계학적 분석을 적절하게 만드는 데 있어서 오히려 장애를 일으키지는 않을지 염려가 되며 다학제간의 노력에 의해서만 이 일이 가능해 질 것이라고 그는 역설했다.

"지표화 특성화(characterization)의 경우 도대체 어느 선까지 자료 수집이 이뤄져야 하는지는 항상 모델러들을 괴롭히는 문제였습니다. 따라서 중요한 것은 적용에 있어서의 분명한 가이드라인이 필요하다는 것이죠. 무조건 잘 특성화된 지역이 필요하다면 그 목적에 따라서 자료수집의 질도 결정될 수 있습니다. 예를 들어 오염부지를 조사할 때 목표가 잠재적인 암발생 위험의 증가에 관한 정확도 높은 예측이라면(Maxwell et al., 1999) 인체 생리학에 대한 우리의 이해가 불확실성에 미치는 영향은 지표화 비균질성이나 자료의 부족보다 훨씬 중요하게 됩니다. 이런 경우 수문지질학자들은 보건 위험 전문가와 긴밀하게 협의해야 합니다. 이같이 모든 불확실성 요소를 모델링하기 위한 포괄적인 접근은 추계학적 패러다임을 보다 적절한 것으로 만들어줄 것입니다. 제 논문(Rubin et al., 2003)에 자연적인 비균질성의 length scale을 이용하여 부지 조사의 노력을 크게 줄일 수 있다는 것을 보여드렸습니다. 추계학적 개념이 수치모델러들에게 이용가능하게 된 좋은 사례입니다."

## 5. 추계학적 수문지질학의 현재에 관한 사회적 접근(Christakos, 2004)

SERRA의 편집장인 George Christakos의 견해는 다분히 사회학적이어서 관심을 끌었다. 사실 그는 이 포럼을 주창한 장본인이기도 해서 유난히 토론내용이 길고 다채로운 인용이 많았다. 그의 주장을 정리하면 다음과 같다.

- 공학자들은 과학자들이 만든 지식을 사용하고 과학자들은 공학자들이 만들어낸 도구를 사용한다. 따라서 이 두 그룹 간에는 건설적인 비평과 정보 및 아이디어의 교환이 끊임없이 이뤄져야 한다. 하지만 많은 경우 과학자들은 추계학적 지표화 수문학 이론의 적절한 표현과 응용기술을 확립하지 못했고 공학자들은 과학자들에게 그들의 이론과 모형을 진보시킬 수 있는 도구를 만들어주지 않았다.
- 추계학적 수문지질학자들의 연구 공동체 그 자체는 잘못이 없다. 하지만 공동체 형성과정에서 생긴 폐쇄성 문제는 분명히 있다. 과학자의 경력은 '이너 서클(inner circles)'의 보호속에서 자라는 것이 분명하지만 과학의 진보면에서는 항상 옳은 것은 아니다.
- 비판적인 대화의 부재로 인해 추계학적 연구노력은 '흥미없는' 문제로 방향 설정되기도 한다. 따라서 과거에는 '공중누각(castle in the air)' 같은 연구도 있었는데 과학적 실재를 반영하지 못했거나 실제 상황을 배제시킨 적도 있었다.
- 또 다른 중요한 사회학적 요소는 추계학적 결과가 법적인 갈등을 낳을 수 있다는 점이다. 기상학분야의 대기순환 모델링은 그런 문제로부터 자유롭지만 오염물의 이동 예측에 있어서는 단속하는 쪽과 이를 피해가려는 쪽의 첨예한 대립이 있을 수 밖에 없다.
- 추계학적 수문지질학 커뮤니티는 더 이상 학문적 테두리내에서만 강화되어서는 안되며 제기되는 여러 가지 문제점들을 공론화해서 해결점을

찾으려는 노력을 기울여야한다. '진실이 침묵으로 대체되는 순간, 그 침묵은 거짓이 되기 때문이다(Yevtushenko, 1975).'

또한 포럼의 주창자 답게 양자의 조화를 최종 결론으로 역설하고 있다.

“과학과 기술은 근본, 방법, 의무와 목적 모두 뿌리부터 다르기 때문에 이런 차이를 이해하고 두 그룹간의 의견을 교환하는 것은 학문적 진보에 있어서 매우 중요합니다. 다양한 견해가 제기되고 비판되고 진전되도록 도그마적 입장을 버리고 기본부터 논의해야 할 것입니다. 모택동은 '과학적인 것은 비평을 두려워하지 않는다(Mao, 1967)'고 하지 않았습니까?”

## 5. 맺음말

1999년 스위스 취리히에서 열린 국제 학회 ModelCARE(Calibration and Reliability in Groundwater Modeling)에 참석했을때 필자는 아주 흥미로운 장면을 목격한 적이 있다. 버클리 대학의

Rubin교수가 추계학적 지하수 모델링에 관한 발표를 마쳤을 때 USGS의 Mary Hill 박사는 “그처럼 현란한 수학적 이론이 과연 현실에서 어떻게 적용될 수 있는나?”며 신랄한 질문을 했고 들은 한참을 논쟁했던 것으로 기억한다. 당시 Sudicky박사도 논쟁에 참여했었는데 주된 내용은 본 고에서 제기된 두 가지 질문과 크게 다르지 않았다. 저명한 학자들간의 기탄없는 질문과 대답을 먼 발치서 바라보는 것만으로도 가슴 설레는 일이었는데 우연히 SERRA에 실린 토론내용을 보는 순간 그때의 논쟁이 구체적으로 공론화 되었다는 사실이 무척이나 흥미롭게 다가왔다. 개인적으로는 추계학적 지표하 수문학에 많은 관심을 가지고 있기에 이 분야의 학문적 발전을 기대하며 아울러 실제 적용에 있어서도 보다 참신한 연구결과가 나오기를 기대해 마지 않는다. 본 고에서는 소개하지 않았지만 토론에 참여했던 미국 기상연구소의 Winter 박사의 말은 그래서 인상적이다.

“지표하 수문학의 역사가 150년인데 반해 추계학적 지하수 이론이 나오지 고작 30년밖에 되지 않았습니다. 인내를 가지고 기다리면 훌륭한 학문적 열매가 맺힐 겁니다.”

## 참/고/문/헌

- Christakos, G.(1992). Random Field Models in Earth Sciences. Academic Press, San Diego
- Christakos, G.(2004). A sociological approach to the state of stochastic hydrogeology. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment Vol. 18, No. 4, pp. 274~277
- Dagan, G.(1989). Flow and transport in porous formations, Springer-Verlag.
- Freeze, R. A.(1975). A stochastic-conceptual analysis of one dimensional groundwater flow in non uniform homogeneous media. Water Resources Research, Vol. 11 pp. 725~741
- Freeze, R. A. and J. A. Cherry(1979). Groundwater, Prentice Hall
- Freeze, R. A.(2004). The role of stochastic hydrogeological modeling in real-world engineering applications. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment Vol. 18, No. 4, pp. 286~289
- Gelhar, L. W.(1993). Stochastic subsurface hydrology, Prentice Hall
- Mao, T. T.(1967). “Oppose stereotyped party writing”. In: Selected works of mao Tse-tung. Foreign Language Press, Peking. vol III, pp 53~68
- Maxwell, R., Kastenber W., and Y. Rubin(1999) Hydrogeological site characterization and its implication on human exposure risk assessment. Water Resources Research, Vol. 35, No. 9, pp. 2841~2855

- Pinder, G.F. and J. F. Sykes(2003) Geohydrological modeling in support of litigation. Paper presented in AGU Fall 2003 Meeting, San Francisco
- Ritzi, R. W., Dai Z., Dominic D. F., and Y. Rubin (2004). Spatial correlation of permeability in cross-stratified sediment with hierarchical architecture, *Water Resources Research* Vol. 40, doi:1029.2003/WR002420, 2004
- Rubin, Y.(2003). *Applied Stochastic Hydrogeology*. Oxford University Press, New York
- Rubin, Y.(2004). Stochastic hydrogeology—challenges and misconceptions. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* Vol. 18, No. 4, pp. 280~281
- Rubin, Y., and S. Hubbard(2004). *Hydrogeophysics*, Kluwer, in press
- Rubin, Y., Bellin, A., and A. E. Lawrence(2003). On the use of blockeffective macrodispersion for numerical simulations of transport in heterogeneous formations. *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 9, SBH4, doi 10.1029/2002WR001727, 2003
- Sudicky, E.(2004). On certain stochastic hydrology issues. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* Vol. 18, No. 4, pp. 285~285
- Weismann, G. S., Carle S. F., and G. E. Fogg (1999) Three-dimensional hydrofacies modeling based on soil probability geostatistics. *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 6, pp. 1761~1770
- Yevtushenko, Y.(1975). *Selected Poetry*. Pergamon Press, Oxford
- Zhang, Y.-K. and D. Zhang(2004). Forum: The state of stochastic hydrology. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* Vol. 18, No. 4, pp. 265~265