한국지하수토양환경학회지 Vol.6, No.1 85~88, 2001
Journal of KoSSGE Vol.6, No.1 85~88, 2001

段步

미국지하수학회 개최 자연정화 및 위해성평가 연수 참가기

고 낙 열*·이 진 용*·이 강 근

서울대학교 대학원 지구환경과학부

A report on NGWA's short cousre of natural attenuation and risk assessment

Nak-Youl Ko · Jin-Yong Lee · Kang-Kun Lee

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

1. 서 언

필자들은 2001년 1월 8-12일, 미국 플로리다주 올랜도에서 개최된 미국지하수학회(NGWA)의 자연저감 및 위해성평가 단기연수를 다녀왔다. 적지않은 비용을 들인 연수이기에 필자들은 연수과정 내내 (매일 오전 8시에서 오후 10시까지) 최선을 다해 강의를 경청하고 교육중 부여되는 예제프로그램들을 연습하였다. 실제로 국내의 이 분야 전문가들은 필자들이 여기서 배운 내용들을 이미 잘 알고 있거나 혹은 연구논문들을 통해 쉬이 접하는 정보일 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 필자들에게는 외국에서 받는 최초의 전문교육이기에 인상깊은 면이 적지 않았다. 여기서 필자들은 관련 분야에 대한 학술적 내용의 전달이나 이에 대한 논의를 하고자하지는 않았다. 다만 이번 미국지하수학회 단기연수를 통해 배웠거나 느낀 점들을 가감없이 전달하고자 한다. 혹여 필자들의 미숙한 영어로 인해 학술적 내용의 전달상에 착오가 있을 수 있음을 양지바랍니다.

2. 본 문

미국 NGWA(National Ground Water Association)에서는 지하수 개발이나 오염 정화 등의 일을 하는 관련 업종 종사자나 이 분야의 연구자들을 위한 단기 교육 과정을 정기적으로 개최하고 있다. 필자들이 다녀온 단기 교육 과정은 NGWA에서 2001년 들어 처음 주최하는 것으로 자연 저감(natural attenuation)과 위해성 평가(risk assessment), 그리고 RBCA(Risk-Based Corrective Action)를 지금까지 개발된 지하수 관련 모의(modeling) 프로그램을 이용해서 분석하고 그에 따라 지하수 오염을 방지하거나 오염된 지하수를 정화시키는 효과적인 방법을 찾는 구체적인 과정을 교육하는 자리였다.

교육 과정 전반부에는 이번 과정에 대한 소개와

각 단계에 필요한 기초지식을 점검하였다. 수리지질학에서 가장 기초가 되는 대수층의 개념부터 지하수 유동과 오염물 이동에 대한 지배식의 도출, 위해성 평가에 이용되는 개념들이 주로 소개하였다. 하지만 우리가 책에서 쉽게 찾을 수 있는 것들만이 소개된 것이 아니었다. 비교적 새로운 기준이나 개념에 대해 연구논문이나 USEPA의 자료 등을 인용해 제시해 주었다. 특히 기존문헌을 통해 널리 알려진 사실과 현장상황과는 다를 수 있다는 것을 예시를 통해 설명하였다.

점토층(clay)의 경우 대개 불 또는 비투수층으로 쉽게 간주하지만 근래의 논문에서는 점토층에 수직적인 크랙(crack)이 있는 경우 수직 방향의 수리전도도가 매우 크게 나타난다 것을 설명하기도 했다. 그런데 이 부분의 강사였던 Dr. Robert W. Cleary는 오염 지하수 정화 설계, 매립지 등에 이용되는 점토 차수벽(clay barrier)에 70% 이상의 농도를 갖는 수용성의 유기 오염물을 갖는 지하수가 흐를 경우 유동성이 매우 커져 차수벽 역할을 하지 못한다고 하였다. 오염물과 점토 입자간의 물리화학적 상호 작용에 의한 것으로 생각된다고 하였다.

Dr. Cleary는 오염물 이동에서 오염운(plume)의 형태에 큰 영향을 주는 분산도(dispersivity)를 추정하는 현장 실험에 대한 강의도 했다. 분산도가 관심영역(domain)의 규모가 커짐에 따라 커지는 소위 분산도의 규모의존현상과 분산도 추정을 위한 현장 추적자 시험에 대해 자세히 설명하였다. 일정한 간격으로 관측정을 설치하고 추적자 실험을 한 것인데 관측정의 수와 측정기간 및 규모에 대해 필자들은 놀랍기도 하고 부럽기도 했다. 이 현장 실험에서는 100m×100m의 영역에 간격이 1m 정도로 관측정을 다중심도로 설치하였다. 우리 현실에서는 시험을 어떻게 잘하느냐는 문제는 두고라도 시험현장의 확보와 시험비용에서부터 문제가 생길 것이다. 같은 분야를 공부하는 사람으로서는 부러운 일이었다.

분산에 관해서는 관측정의 스크린(screen)의 위치가 중요함을 강조했다. NAPL이 지하로 내려가서 지하수면에 도달하면 극소량이나마 용해가 일어나면서 자유면 대수층을 따라 이동하게 된다. 이런 경우, 특히 밀도가 큰 DNAPL은 오염운이 지하수면에 걸치지 않고 대수층 내부에 분포하는 경우가 생길 수 있다. 그렇다면 관측정의 스크린이 지하수면 근처에 설치되었거나 대수층 바닥에 설치되어 오염운을 관측하지 못할 수도 있다. 때문에 오염물질이 아직 도달하지 않았다고 판단할 수도 있는 것이다. 이런 관측 오류는 분산도를 작게 추정하게 만들어 모의 결과가 현장과 다르게 나타나게 하는 원인이 될 수 있다. 또 다중심도 관정을 설치하지 않고 전체구간 스크린을 했을 때는 섞임(mixing)현상에 의해 오염농도가 저평가되어 추정분산도가 매우 크게 나타나는 경우가 많다고 했다. 이런 현상은 필자들(제2, 3저자)도 연구(Journal of Contaminant Hydrology, in press)를 통해 경험한 바라 상당히 이해가 가는 부분이었다. 특히 매질의 불균질성에 대한 우리의 이해가 증대된다면 이러한 분산도 문제가 상당히 해결될 것으로 전망했다.

과정의 중반부는 지하수 유동 모의 프로그램에 관한 것이었다. 주로 Waterloo Hydrogeologic 사(社)의 프로그램을 이용하였다. 2-D의 지하수 유동을 간결하게 보여주는 Flowpath Ⅱ, 오염물의 이동을 모의하는 MT3D와 그 반응관계까지 염두에 둔 RT3D, 3-D의 유동을 모의하는 MODFLOW와 함께 MT3D, RT3D를 이용하게 해 주는 Visual MODFLOW등이 자연 저감이나 위해성 평가, RBCA 등에 이용되는 것을 예제를 통해 알 수 있었다.

이 부분은 Waterloo Hydrogeologic의 사장인 Dr. Nilson Guiger가 맡았는데, MODEFLOW, MT3D 등의 수치 모의 프로그램에서 이용하는 유한 차분법(finite difference method)의 한계, 고정 수두 경계(constant head boundary)와 일반 수두 경계(general head boundary)의 차이, MT3D에서 오염물 이동을 나타내는데 이용되는 풀이 기법(solution technique)중에서 MOC와 MMOC의 차이점, 실제 모의시 생길 수 있는 문제에 대한 대처법 등 주로 모의 프로그램을 이용하는 사람에게 도움이 되는 실용적인 내용을 강연하였다. 필자들은 Dr. Nilson에게 pump-and-treat 계획시 양수정의 개수 및 최적 위치 설정 방법과 오염물 자연저감 산정시 전자수용체의 재

충진에 대한 평가방법에 대해 질문하고 이에 대해 토론하였다. 이 외에도 해석해를 바탕으로 한 PRINCE 5와 6 등 자연 저감을 모의하는 프로그램을 예제를 통해 습득하였다.

과정 후반부는 위해성 평가에 관한 것이었다. 지하수나 토양의 오염이 자연 환경과 사람에게 미치는 영향을 평가해 인위적인 오염도 저감조치의 필요여부를 판단하는데 효과적으로 사용하였다. 이때 위해성은 발암 물질과 비발암물질에 의한 영향을 따로 구분하였다. Bioscreen, RBCA Toolkit for Chemical Releases, RBCA Tier2 Analyzer, SmartRisk, Biochlor 등을 이용한 위해성 평가 예제를 해보았는데 이론적으로는 강력해 보이지는 않았으나 꼭 필요한 과정이라고 생각되었다. 특히 바다와 인접한 강 유역에서 오염 상황이 일어났을 때, 그 영향을 평가하는데 있어서 강, 바다, 토양의 오염은 물론 근처 주민들이 오염 토양이나 강물로 인해 받는 영향, 강이나 바다에서 잡힌 생선에 의한 영향을 함께 고려하였다.

연수 종반에는 Dr. Cleary가 Superfund 사이트(site)에 대한 자연 저감을 이용한 모의와 현장에서 효율적으로 수리지질학적 자료를 모으는 여러 방법을 강의하였다. Superfund 사이트의 경우 BTEX에 의한 오염이 발생한 지역에서 자연 저감 양상을 보여주었는데, 호기 환경과 혐기 환경에서 BTEX가 반응에 의해 저감되는 과정을 잘 나타내주었다. 염화오염물질(chlorinated contaminants) 저감 과정에서 나오게 되는 염소성분을 이용해 저감 정도를 평가하는 것이 흥미로왔고, pump-and-treat 수행시 양수정(pumping well) 수와 양수량(pumping rate), 관리시간과 주변 수계로의 영향을 최소로 하는 조건에서 최소의 비용(이 모의에서는 양수량과 설비에 이용되는 전기 비용을 제한 조건으로 두었다)을 만족하는 모의를 시도했다. 이때, 최적 위치는 수리지질학적 조건을 통해서, 양수량은 지정된 지역외로는 오염운이 진행하지 못하도록 하는 값으로 최적화하였다. 이때 위치와 양수량은 시행 착오(trial-and-error) 방법을 이용해 결정하였다.

마지막으로는 현장에서 다중심도 관정을 설치하는 과정과 그것을 이용한 대수층에서의 수직적인 유속 분포 양상을 알아내는 현장 실험을 강의했다. 반경이 작은 관을 여럿 이용하거나 큰 관 안에 위 아래로 뚫린 여러 개의 구역을 나누어 각 구역에 스크린을 다른 심도로 만들어서 다층양수를 하는 것을 보았는데 이런 기구가 미리 있던 것이 아니라 현장에서 필요에 의해 다른 기구들로 만들었다. 또 지하수 유동모의에서 어려운 파라미터의 하나인 stream bed의 컨덕턴스를 결정하기 위한 현장실험 방법을 설명하였다. 특히 한 대수층에서 좁은 구간에서도 짧은 간격으로 떨어진 심도간의 큰 유속 차이를 볼 수 있었다. 심한 곳은 10배 이상의 차이가 나기도 했다. 이런 경우 오염물질의 수평적 분산에 큰 영향을 미쳐 수직적인 오염분포가 매우 다르게 나타났다. 보통 하나의 대수층 혹은 한 layer에서는 물리적 성질이 같다고 생각하고 모의하는 경우가 많은데 이러 경우 현장에서의 얻어진 자료를 재연하는데 매우 어려움을 겪는다고 하였다. 또한 이런 매질의 불균질성은 오염 정화 설계와 수행에 많은 어려움을 유발한다고 하였다. 교육을 종료하면서 약 1시간의 자유질문과 토론시간을 가졌다. 교육시간 끝난 후에도 필자들은 대여한 컴퓨터를 반납하기 전까지 반복해서 예제들을 풀었고 강사들과 기념사진을 찍으면서 이번 단기연수를 끝냈다.

3. 후 기

이번 교육 과정의 수강생들은 필자 일행을 제외하고는 모두 관련 직종에 종사하는 기술자들이었다. 쉬는 시간이나 질문 시간이 되면 이들은 자신들이 전에 경험했던 현장 문제를 강사들이 말해준 이론과 결부시켜 질문하고 그에 맞춰 강사들은 그 문제에 대한 해답을 주도록 노력하였다. 미국지하수학회(NGWA) 말고도 미국에서는 각 대학이나 지하수 관련 단체, 회사에서 이런 종류의 교육 강좌를 많이 준비하고 있다고 한다. 이번 과정에서 지하수 모의 프로그램 부분을 맡았던 Waterloo Hydrogeologic사의 경우 일본, 쿠웨이트 등 해외에서 강좌를 개최하기도 한다.

흔히, 주로 현장에서의 활동을 중시하는 사람들은

이론적으로 부실할 수가 있고, 실내에서 모의 프로그램을 이용하는데 중심을 두는 사람들은 현장에서 이루어지지 못할 이상적인 상황을 만들어 내기도 한다. 이런 정기적인 교육을 통해 어느 한쪽에 치우쳐지지 않고 이론과 실무를 모두 충실히 안배해 줄 수 있으면 좋겠다는 생각을 했다. 학회나 관련 기업체, 연구기관의 유기적 협력을 필요할 것 같다. 올랜도의 날씨는 무척 변덕스러웠는데 입고 간 겨울 외투와 반팔 여름 티를 번갈아 가며 입었다.