

[논 단]

최근의 수문학

— Kalman Filter 이론과 Filter 분리 AR법을 중심으로 —

히노 미끼오* 최 영 박** 윤 강 훈***

1. 수문학의 발자취

A. 수문학의 탄생

우리 동양인의 입장에서 본다면 매우 기이한 것이라 할 수 있지만, 유럽사람들은 오랫동안 하천수가 강우에 의한 것이라는 것을 이해하지 못한것 같다. 예를 들어, 17세기라 하면 이미 신대륙이 발견되었고(1492년), 레오나르도 다빈치가 나타났으며 코페르니쿠스에 의해서 지동설이 주장되었다. 또한 갈릴레오에 의해서 근대 과학의 기초가 확립된 시대였으나, 당시의 일류학자인 크리처(Kricher)는 다음과 같이 유출에 대하여 막연하게 말하고 있었다.

「산 밑의 지하에는 큰 동굴이 있고, 그곳에서 맑은 물이 분출되어 나온다. 이것이 하천의 원류가 된다. 이 물은 해수로부터 보급이 되고, 해수는 바다의 조석작용이 펌프역할을 하거나, 화산의 지열을 원동력으로 하여 양수되며, 해수중의 염분은 땅속에서 걸러져 암염으로 된다.」

유럽은 일반적으로 강우가 적고(아시아의 반 정도, 700mm/yr), 지형이 평탄하다. 먼 알프스 산중의 빙하로부터 발원된 강들은, 라인강이나 도나우강 같은 대하천을 이루며, 유역의 도처에서 지하수가 풍부하게 분출되는 것을 생각하면, 그들이 이와같이 생각하는 것도 무리는 아닌 것 같다. 그러나, 갈릴레

오, 뉴톤에서 시작된 근대과학의 세기로 들어 오면서 학문으로서의 수문학이 탄생하게 되었다. 근대과학의 정신은 「논리」와 「실증」이라는 중요한 두 면을 갖고 있다. 수문학의 성립도 바로 이 두개의 과학정신에 뿌리를 두고 있다.

17세기 프랑스의 '페로'(Perrault, 1608-1680)는 '세느'강 지류의 작은 유역에서 3년간 강우관측을 시행하고, 이 강의 추정유량이 그 유역강우의 1/6 정도임을 실증하였다. 그러나, 이와 같은 사고방식을 발표하는 것이 당시로서는 매우 용기가 필요한 일이었을 것이라는 생각이 든다. 그의 저서 「샘의 기원에 대하여」는 1674년 익명으로 발표되었다. 바로 이것을 기념하여 1974년 파리에서, UNESCO, IAHS, WMO의 공동주최로 '과학적 수문학 300년제'가 개최되었다.

같은 시기에 프랑스의 '마리오프'(Mariotte, 1620-1684)도 '페로'의 견해가 옳음을 실증하였다. 그때는 '뉴톤'(Newton, Isaac, 1643-1727)이 '자연철학의 수학적 원리(Philosophiae naturalis principia mathematica, 1687)'를 발표하여, 근세 과학, 특히 '역학의 세계'가 화려하게 시작되는 시기였다.

그러면 강우의 근원인 물은 어디에서 오는 것일까? 이 물음도 같은 시기 뉴톤의 젊은 친구인 - 뉴톤에게 '자연철학의 수학적 원리'의 집필을 권고한 사이이며, '헬리'혜성의 궤도를 예언하여 본인의 이름을 혜성의 앞에 부치게 된 - '헬리(Hally)'는 해면에서 증발한 수증기들로 충분히 강우가 이루어 질

* 동경공업대학 교수

** 전회장, 고려대학교 명예교수

*** 정회원, 한국건설기술연구원

수 있다는 것을 계산으로 보여 주었다. 그리하여 17세기에 들어와서 비로소 물의 순환에 대한 올바른 기본개념을 정립하게 되었다. 19세기는 완전유체에 대한 고전이론의 완성과 점성유체역학의 탄생시기였으며, 영국에서 일어난 산업혁명의 영향으로 유체역학과, 실험에 뿌리를 둔, 실제적용을 목적으로 한 수문학과 수리학이 발달한 시대였다. 이 수문, 수리학 분야에서는 한결같이 유량산정에 대하여 관심을 가져 다수의 실험적 평균유속공식, 즉 유량공식이 제안되었으며, 수리분야에서는 ‘다시(Darcy)’로 대표되는 지하수리학이 완성되었다.

B. 근대 수문학의 성립

수문학이 근대 과학으로 성립한 것은 잘 알려져 있는바와 같이 1930년대 두명의 미국사람에 의해서였다. 1932년 ‘셔만(Sherman)’은 단위도 개념을 제안하였다. 이것은 수문계를 거시적 입장에서, 근대적 표현으로 한다면 시스템으로 본 것이었다. 이에 반해서 ‘호턴’(Horton, 1933)은 강우의 지표에서의 침투라는 미시적 입장에서 수문학 이론을 제안하였다. 이들 두개의 이론은 참으로 훌륭한 것이었으나, 반대로 그 영향이 너무 강력하여 이것이 그 후의 수문학 발전을 오랫동안 저해하였다고 말하는 학자들도 있다.

C. 유출모델의 시대

1930년 이후의 수문학은 말하자면 유출모델의 시대라 할 수 있었다. 현재 우리들이 사용하고 있는 유출모델의 대부분은 이 시대 - 특히 1950년대 - 에 제안되고 여기서 살아남은 것들이다. 그러면 왜 이와같이 「수문학=유출모델」로 되었는데에 대해서는 여러가지 설명이 있었다.

제 2차 세계대전중과 그 이후에, 황폐한 산하를 태풍이 빈번하게 내습하여 심각한 홍수피해가 발생하였으며, 그로 인하여 정확한 홍수량 예측이 필요하게 된것이 그 첫째 이유였다. 강우와 유출이라는 가장 확실한 인과관계의 계산이 의외로 복잡해서, 간단하게 만족할 만한 결과를 얻을 수 없었던 것이, 연구자들로 하여금 미지의 계산플이에 더욱 몰입케 한 감도 없지는 않았다. 그렇지만, 유출모델의 문제

가 수문학의 극히 일부에 지나지 않음에도 그것에 너무나 많은 수문학자들이 관심을 갖고 붙잡혀 있는 것이, 수문학의 발달을 지연시킨 한 원인이라고 지적하는 학자들도 있다. 필자 또한 앞으로는(소위 집중형의) 유출모델연구를 어느 정도 자제하여야 한다는데 동감한다.

그러나 슈퍼 컴퓨터의 출현에 의해 가능해지고 있는 유출의 직접 시뮬레이션이나, 최근의 유출과정의 물리기구를 기반으로 이것을 적용한 ‘Advanced Model’ 연구는 크게 장려해야 한다고 생각하고 있다.

2. 유출모델의 분류

여기서 소위 유출모델을 분류 정리해 보는 것도 충분한 의미가 있는 것이라 생각된다.

Black-Box Model

유출모델의 분류라고 말하는 경우 자주 ‘Black-Box’라든가 ‘White-Box’라든가 하는 용어를 자주 접하게 된다. 그런데 단위도법이라든가 AR (Autoregressive) 법은 ‘Black-Box’ 모델에 속하여, ‘White-Box’ 모델보다 은연중에 저차원의 모델이라는 느낌이 들게하고 있다. 그러나 나는 그렇지 않다고 생각한다. 어느 모델이 유출현상을 매우 잘 표현하고 있다면, 그 모델이 실제의 수문과정을 바르게 표현하고 있기 때문이다. 그 경우 오히려 물리기구와 그 모델간의 관계에 대하여 설명하도록 노력하는 것이 중요하다고 생각한다. ‘히라노 무네오(平野宗夫;九州大)’나 ‘야마다 다라시(山田正;東工大, 現北大)’등이 제안한 斜面長分布 모델에서는 단위도를 ‘Kinematic Wave’법의 합성형으로 표시하고 있다.

선형모델·비선형모델

유출모델은 선형 또는 비선형으로 표현 가능하다. 잘 알려져 있는 바와 같이 단위도(그리고 이의 변환형인 AR법)모델은 선형이나, 저류합수법, ‘Kinematic Wave’법, ‘Volterra-Wiener’법 등은 모두 비선형모델이다.

단일성분 모델과 다성분 모델

어떤 유역에 대한 다수의 유출모델은 크게 단일성분 모델과 다성분 모델로 분류하는 것이 좋다고 생각한다. 유출현상은 오랜기간 성분모델로 연구되어 왔다. 그 결과 유출의 비선형성을 단일성분모델로서는 잘 설명할 수 없다는 것을 알게 되었다. 예를 들어, '저류함수법'에서 매개변수의 변동성이 너무 크다는 것과 'Volterra-Wiener'법도 수학적으로는 훌륭한 것이나, 수치적으로는 유출의 비선형성을 충분히 재현할 수 없다는 것 등이다. 이와 같은 생각에서 극히 단순한 '스가와라(菅原)'의 다단탱크모델이 실용적으로 각광을 받게 되었다.

필터-분리 AR 법(역탐법)

'필터-분리 AR법'의 착상은, 강우와 유출의 크로스-스펙트럼(Cross-Spectrum)을 구하면 'Coherence'나 'Phase'가 확실하게 차이가 나타남에 따라, 유출성분을 세개의 성분으로 나누어서 해석해야 된다는 것에서 시작하였다.

그리고 이것은 수문학에서 옛부터 인정되어 내려온 표면, 중간, 지하수유출 성분이라는 개념에도 합치된다. 이것이 'Stochastic Hydrology'가 'Physical Hydrology'로 변화되는 전환점이 되었다. 각 유출성분이 표면류 성분이므로 선형계로 표시된다는 것, 그리고 유출의 비선형성이 강우의 성분 분리측에 있다는 것은 수문학자들에게 있어서 경이적인 것이었다.

필터에 의한 분리성분계는 단순한 수치처리이며, 편의적인 것으로서 실제의 유출성분은 별도의 것이라고 말하는 인사도 초기에는 있었으나, 'Sklash & Farvolden'이 유출수 중의 동위원소 ^{18}O - ^{16}O 의 자료를 재해석해 본 결과와 필터 분리의 결과가 일치하였다는 것으로 인하여, 이에 대한 의구심이 없어지게 되었다.

현재 수문학자들의 연구는, 1) 새로운 수문학적 지식에 기본을 두고 이를 고려한 모델을 개발[예컨대, Beven & Kirkby(1970), O'Loughlin(1981)]하는 방향과, 2) 포화-불포화 삼투방정식의 수치값을 구하는 두개의 방향으로 나뉘어 진행되고 있다.

2)방향의 연구는 'Freeze(1972)'가 이차원 유출에 대해서 이미 10여년 전에 시도를 하였으나, 그 후 적어도 일반적으로 입수할 수 있는 문헌에서 보는 한, 별 진전이 없었다. 그럼에도 불구하고 최근에 슈퍼컴퓨터의 출현으로 인하여 임의형상의 삼차원 유출에 대한 프로그램 개발이 시행되고 있다. 특히, '사이다마(境玉)'대학의 '와타나베(渡邊邦夫)'교수는 'FEM'을 사용하여 'Variable-Source-Area'의 발생등에 대한 흥미있는 결과를 발표하고 있다. 현재 본인은 프로그램의 간편함과 격자수가 최소화라는 이유에서, 일반화 좌표계에 의한 이차원 및 삼차원 유추량을 차분법에 의하여 해석할 수 있는 프로그램을 개발중이며 대략적인 결과를 얻을 수 있었다. 崎

'야마나시(山梨)'대학의 '수나타(砂田憲吾)'교수는 횡방향의 변화가 고려된 삼차원적 'Kinematic Wave'법 프로그램을 개발하였으며, 실제지형에서의 유출(표면유출 및 중간유출)을 구하였으며, 같은 방법으로 계곡부 'Source-Area'에서의 유출을 표시하였다. 이것에 대해서는 일본 문부성 과학연구비「비교 하천학」의 1985년도 보고서에 게재되어 있다.

3. 최근의 수문학 특히 'Variable-Source-Area 개념'과 물리수문학의 성립

최근 수문학은 급속하게 그 대상범위를 확대하고 있으며, 연구의 깊이를 깊게 하고 있다. 홍수예보, 강우예측 등의 제어예측이론 범주에 포함되는 것, 강우 레이다등의 소위 하이테크노로지등을 응용한 것, 수자원 계획등의 계획관리기법에 관한 것 등 대단히 다양하다. 하지만, 그 중에도 본인은 'Partial-Source-Area' 내지 'Variable-Source-Area'의 개념성립과 이에 이어지는 물리수문학을 먼저 거론하고자 한다. 흔히 얘기하는 것처럼 학문이나 기술의 발달은 연속적이 아니고 불연속적이다. 수문학의 발달도 예외는 아니다. 본인 생각으로는 수문학은 약 15~20년을 한 구간으로 하여 발달하여 왔다고 생각한다.

1930년대 처음으로 'Sherman'에 의한 단위도 제

안, 'Horton'의 침투이론에 기본을 둔 유출모델, 1950년대의 'Dynamic Hydrology', 1960년대 이후부터 1970년대에 걸친 'Stochastic Hydrology'등이 그 발달과정이라 할 수 있다. 이들을 보다 발전시킨 것이 최근에 있어서의 'Partial-Source-Area'개념 혹은 'Variable-Source-Area'개념이다.

최근의 연구에 의하면, 유출은 'Horton'이 주장하는 바와 같이 강우가 최종 침투능을 초과할 때에 산허리 사면의 전역에서 발생하는 것이 아니라 계곡의 시작부분이나 토양의 넓은 부분(Partial Area)에서 발생하거나, 또한 그 부분의 면적도 강우와 함께 신장, 축소하는(Variable Area) 것이며, 그 사실은 산중에서 강우를 조사한 세심한 관측자들이 이미 알고 있었던 사실이었다. 세밀한 논리를 전개하는 이론수문학자인 '다카사오(高殊, 1963)'교수는 벌써 이 사실을 지적한바 있다. 또한, 도오코 노고(農工)대의 '즈카모토(塚本, 1966)'교수나 니이가다(新濁)대의 '오카모토(岡本, 1972)'교수도 삼림지나 산복사면을 관측한 결과 표면류가 거의 발생하지 않았다는 것을 보고하고 있었다. 그런데 1960년대부터 발표되기 시작한 미국의 'Hewlett(1961)'나 'Betson(1964)', 'Black & Dunne(1970)'등의 논문은 수문학의 흐름을 바꾸는 커다란 충격을 주었다. 그것은 알고보면 당연한 것으로서, 'Horton'의 지나친 영향력으로 인하여 「실증」이라는 근대과학의 중요한 일면을 망각한 수문학자들의 우둔함을 깊이 반성케 하였다. 즉, 강우가 지면의 침투능을 초과할 때 표면류가 발생한다는 'Horton'류의 사고에 대한 의문이 'Hewlett'나 'Betson'에 의하여 1960년대부터 시작되었다. 이것은 'Betson'의 주의 깊은의문에서 시작되었다. 그는 'Horton'의 침투이론이 맞는 것으로 가정한 후, 침투식 중의 파라메타를 많은 실측자료와 비교하여 보았다. 이 침투식을 이용해서 재차 실측강우에 대한 직접유출량을 계산하여 보면, 물론 잘 맞으며, 보통은 이것으로 끝난다. 그런데 'Betson'은 약간 주의깊게 보았다. 이와같이 산출한 계산유출값과 실측유출값을 비교하고 오차를 계산한 결과, 오차는 강우량에 대하여 일정한 관계가 있는 것을 알

게 되었다. 'Betson'은 이 오차가 유출은 산허리사면 전체로부터 발생하는 것이 아니고, 그 일부에서 발생한다는 것을 잘 설명하고 있다고 판단하고 이것으로부터 'Partial-Source-Area'의 개념을 제안하였다. 이것이 우리가 접할 수 있는 문헌에 나타난 'P.S.A'개념의 시초이다. 倬 倬 倬

그런데 이것과 거의 동시에 정확하게 표현해서 약간 빠르게, 'Hewlett'는 미국의 북캐롤라이나 주에서 현지관측과 대형침투계를 이용한 실험을 한 결과 측방류의 발생이나 불포화 침투류의 중요성을 지적하였고, 동시에 'P.S.A'개념을 제안하였다. 현재 구미 연구자들은 'Hewlett'의 공적을 높이 평가하고 있다. 그러나, 본인은 그의 보고서를 입수할 수 없었으며, 'Beston'의 논문에도 인용되고 있지 않았다. 그림 1은 'Hewlett & Nutter(1970)'의 문헌에서 인용한 것이며, 강우시간의 진행과 함께 곡선두부에 표면유출부(소위 'Variable-Source-Area')가 발달, 성장, 소멸하는 과정을 모식적으로 잘 나타내고 있다.

4. Kalman Filter에 의한 홍수의 온라인 예측

다음으로는 우리들이 가장 흥미를 갖고 있는 홍수의 온라인 예측에 대하여 이야기하기로 하자. 본인은 연구생활의 초기부터 홍수예측문제에 관심이 있었다. 이것은 내가 처음부터 현재까지 계속하고 있는 연구과제인 난류유출문제가 불규칙자료처리(스펙트럼분석, 상관분석 등)와 유출예측문제에 깊이 관련되고 있기 때문이며, 또한 내가 전력중앙연구소 재직시(1960-1967)에, 인접 보일러제어 연구실에 근무하는 1년 연하의 친구가 그와 관련된 연구를 하고 있었기 때문이다. 전력중앙연구소 재직시절에 난류확산, 대기오염의 현장측정과 풍동실험, 전자계산 작업을 하였으며, 이어서 1970년대에 들어와 통산성의 대기오염 예측제어 프로젝트(문부성의 환경제어 특수연구그룹)에 참가하였다. 그후에도 그와 관련된 예측문제에 참여하게 되었다.

“실측유량으로부터 몇시간 이후의 홍수량을 어떻게 예측할 수 있을까?”하는 생각에 골몰하였다. 이

때 돌연 번갯불처럼 머리에 떠오른 것이 그때까지 10년간 몇번이나 “실제적인 문제에 적용할 수 없을 까?”하고 생각하였던 ‘Kalman’의 ‘Filtering’이론이었다. 이 논문은 Trans. ASME(미국 기계학회지의 논문집)에 1960년에 게재된 것으로, 전력중앙연구소의 잘 정돈된 도서관에서 이 논문을 발견하고는 곧 여기에 관심을 기울여 왔으며, “어디엔가 이것을 응용할 곳이 있을 것이다.”라고 생각하였다.

A. Kalman Filter의 쉬운 설명

여기서 ‘Kalman’의 이론을 알기쉽게 설명하고자 한다. ‘Kalman’의 이론을 식으로 표시하면(행렬을 사용하면) 매우 복잡하기 때문에, 이것을 수학적으로 유도하는 것은 대단히 어렵다. 하지만 예측이라고 하는 것도 결국은 우리들이 일상적으로 시행하고 있는 경험이나 판단을 간단한 조건하에서 수식으로 표현한 것에 지나지 않는다. ‘Kalman Filter’의 경우는 다음과 같이 생각하면 좋다. 우리들은 매일 매일의 경험을 쌓고 있으며, 이것이 각자의 행동기준이 된다. 만약 어느날 그 기준에 의한 판단과 합치되지 않는 것이 생겼다고 하면, 기존의 행동기준을 바꾸어야 할 필요가 있다. 그러나 단 한번 기준판단과 합치하지 않는 것이 생겼다고 해서, 그날부터 전체 기준을 바꿀 수는 없다. 날마다 기준의 합치여부 또는 지체여부를 관찰하고 서서히 기준을 바꾸어 가게 된

다. 예컨대, 동경 지하철에서 통근시간대에는 매우 혼잡하다. 역마다 타는 사람도 있고 내리는 사람도 있다. 하지만 사람은 무의식중에 거의 일정한 시각에 일정한 칸의 좌석에 습관적으로 탄다. 그러므로 어느 시각의 지하철의 몇 번째 차량의 어떤 좌석부근은 다음 역에서 내리는 사람이 몇명인가를 경험적으로 알 수 있다. 이와 같은 경우에는 될 수 있는대로 빈자리가 많게 되는 차량에 타면 좋을 것이다. 나는 오오후네(大船)역에서 동경역으로 향하는 지하철을 이용한다. 오오후네역의 다음은 도즈카(戸塚)역으로서 여기서 상당한 수의 사람들이 내린다. 이는 미쓰비시 제작소의 전자계산기 생산부문이 그곳에 있기 때문이다. 그래서 나는 자리에 앉기 위해서 연구원풍의 샐러리맨들과 같이 생긴 사람 가까이에서 있다. 그런데 어느날 돌연히 내리는 사람이 적게 되었다고 하자. 만약 내리는 사람들의 회사가 이전 하였다면 빨리 판단기준을 변경하여야 하지만 예를 들어, 오늘이 그 사람들 회사의 창립일로서 휴일이라고 하면 그 행동기준을 변경할 필요가 없다. 조금 오랜기간의 변화를 관찰하면서 조금씩 판단기준을 변경하는 것이 우리들의 일반적인 사고방식인 것이다. 이 변화에 대한 행동기준의 조정도를 구하는 것이 곧 ‘Kalman Gain’을 구하는 것이다. 그렇다면 어떻게 ‘Kalman Gain’을 구하는 것이 좋은가? 우리

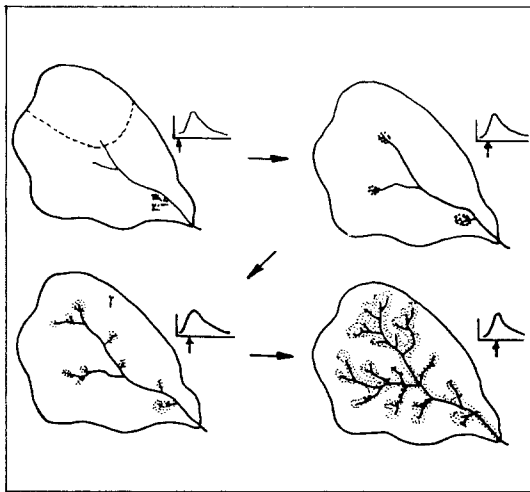


그림 1. 홍수중의 유출기여역과 유로계의 발달 (Hewlett & Nutter, 1970)

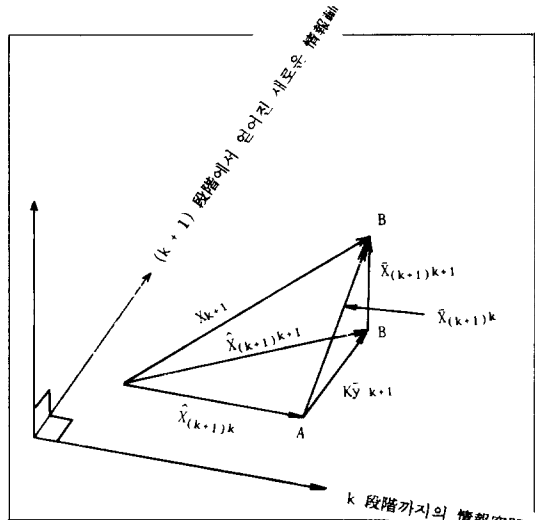


그림 2. Kalman이론의 시각적 설명

들은 3차원 이상의 도형판단은 불가능하므로, 편의상 이들을 모두 정리하여 지금부터 한 시점 이전의 모든 정보를 한 축선상의 점으로 표현하기로 하자. 일단, 현 시점에서 새로운 정보가 얻어졌다고 하면 이것을 제 2의 축으로 표현한다. 따라서, 현재 및 과거의 정보에서 알고 있는 사항들은, 이 두 축이 이루는 평면상에 있다. 진짜 상황은 현재 및 과거의 정보로부터 추정할 수 없는 정보성분도 포함하고 있다. 이 알 수 없는 정보를 제 3의 축으로 표현하면, 현 시점의 정보에서 추정할 수 있는 벡터로서 진짜 상태인 벡터와 가장 차가 적은 것은 진짜 벡터가 평면상에 투영된 벡터이다. 따라서 현 시점에서 새로운 정보가 얻어졌을 때는 과거의 정보에서 추정된 제 1 축선상의 벡터에, 예측과 실측과의 오차벡터(그림 2의 AB)의 수평면상의 성분(그림 2의 BB'), 이것이 현재까지의 정보로 알 수 있는 것임)을 더하면 좋다는 것을 이 개념도를 통하여 매우 쉽게 알 수 있다. 1977년대 스웨덴 'Lund'에서 개최된 제 2회 IAHR의 'Stochastic Hydraulics'에 논문을 발표할 때, 이 그림을 슬라이드로서 나타내니까 'Yevjevich' 선생이 꼭 'Proceedings'에도 삽입하라고 하였다(그러나 그 시간을 얻을 수 없었다). 그후, 여러 학자들께서도 이 그림을 종종 사용해 주었다.

B. Kalman Filter에 의한 홍수예측

실제로 'Kalman Filter'를 홍수예측에 적용하는 경우, 두가지 접근방법이 있다. 하나는 유량 그 자신을 예측해야 할 상태변수로 하는 것이며, 다른 하나는 홍수예측이 곤란한 것은 유출의 특성이 변화하기 때문이므로, 유량시계열에서 유출특성을 시시각각 보정해야 한다는 사고방식이다.

이와 같은 사고방식에 기본을 두고, 1971년의 이스탄불에서 개최된 IAHR에 본인이 논문을 제출하였는데, 이것은 'Kalman Filter'를 홍수예측에 응용한 최초의 논문이 되었다. 실은 'Kalman Filter'의 응용은 그 당시 동시에 시행된 대기오염 예측에 관한 연구에서 알게 된 것이었으며, 그쪽이 당시로서는 더 시급한 일이었다. 'Kalman Filter'를 홍수나 대기오염 예측에 응용하였을 때, 제어공학을 전공하

는 분들은 의외로, 'Kalman Filter'에 다변해석을 조합한 필자의 방법이 어떻게 그렇게 잘 들어맞느냐고 말해 왔다.

C. 역탐법(Filter-분리AR법)의 발상

이 'Kalman Filter'에 의한 홍수예측은 상당한 성공이었으나, 필자의 생각으로는 예측성능면에서 아직도 불만이 많았다. 사물이란 것은 한쪽으로부터 접근해 가면 해석이 잘 되지 않는다. 이 경우도 마찬가지였다. 그리하여 홍수예측 방향은 잠시 유보하고, 그로부터 수년간은 연구팀에 새로이 조수가 된 '하세베(長谷部)'와 'AR'을 사용한 유출해석에 몰두하였다. 다시 되풀이하여 말하지만, 무엇이든 사물의 본질은 단순한 것이라고 생각한다. 홍수예측이라고 말하면 어떤 이유든 간에 강우의 시계열을 안다면, 하천유량을 계산하고 예측하는 것이 가능하다고 생각하기 마련이다. 그것은 강우가 홍수의 원인이므로 당연한 것이다. 하지만 홍수예측을 필요로 하는 하천에서 강우자료와 동시에 유량자료가 얻어지는 것이 보통이고, 측정의 정밀도도 보통 유량자료쪽이 훨씬 높다. 거기에서 유역중에서 강우의 공간 분포는 균일하지 않으므로, 강우 중에서 유출성분을 분리한 것만을 시스템에 입력하는 것이 거의 불가능하다. 그렇다면 신뢰도가 높은 홍수량의 관측치를 홍수예측에 적극 이용하는 방법밖에 없다.

다음으로 유량은 강우에서 변환된 것이므로, 어떤 방법이든 정확도가 높은 유량자료로부터 유효강우량을 추정할 수 있지 않을까 하는 생각이 그동안의 생각이었으나, 이러한 고민에 대해서는 「수문유출해석(森北出版)」에 자세히 논술하였다. '하세베(長谷部)'는 유량시계열을 'ARMA(Autoregressive Moving Average Model)' 식으로 표현하면 잘 맞다는 것을 알았다. 필자는 이것을 강우에 대해서 적용한 후, 두개의 방식을 결합시키고자 생각하였다. 그러나 강우시계열은 백색잡음이므로 무리라고 생각하였다. 오히려 "유량과 그것에서 구하는 'AR(Autoregressive)'계수에서 백색잡음 항을 역산하여 보기로 하자. 그것이 유효강우일 가능성이 충분히 있다."라는 것이 필자의 생각이였다.

그 결과는 의외로 큰 성공이었다. 수문계는 지하, 중간유출은 물론 표면유출도 선형계이고, 다만 강우 성분계의 분리축이 비선형인데 불과하다. 그리고 각 유출성분의 시계열은 분리축을 알지 못하여도 유량 시계열의 수치 'Filter'화로 분리할 수 있다. 모든 문제가 한꺼번에 얼음 녹는 것같이 되었다. 'Filter-분리 AR 법'과 'Kalman Filter'를 조합하는 것이 좋다는 것을 알게 되었다.

D. Kalman Filter와 역탐법의 조합

이때 한국의 김치홍 교수가 필자의 연구에 참여하게 되었다. 다음은 김교수가 일본에 체재 중 필자와 함께 연구해서, 김교수의 박사학위논문이 된 것으로 대체적인 접근방식은 다음과 같다. 즉, 시시각각의 유량시계열은 수치 'Filter'에서 성분으로 분리하고, 여기서 성분강우를 역산하고, 역산된 추정강우에 'Kalman Filter'에 의한 보정을 각각 시행하면 좋은 결과를 얻는다는 것이다. 'Kalman Filter'를 홍수에 축에 사용하는 경우, 상태변수로는 이때까지 ① 유량, ② 유출계의 상태(예컨대, 유역저류량 등...), ③ 유출계의 매개변수를 생각하였다. 여기에다, ④ 이때까지의 이론에서는 조건으로 주어지는 것으로 취급 됐던, 강우(시스템의 驅動力 즉 유효성분)를 상태변수로 취급한다는 전혀 새로운 생각에 도달하게 된 것이다.

5. 최근의 물리수문학

최근 수문학의 흐름중 하나는 전술한 바와 같이 「물리수문학(Physical Hydrology)」이다. 이 말 자체는 전에도 사용된 바 있으나 그 의미는 지금과 전혀 다르게 쓰였다. 즉, 현재는 주로 강우가 유출로 나타나는 과정을 물리학적인 관점에서 설명하려 하는 것이다.

A. 모래(Sand)보다도 양토(Loam)쪽이 비를 더 삼투시킨다.

예를 들어, 한 상자의 중앙에 칸막이를 하고, 그 상하부분을 막지 않는다. 이 상자의 한 쪽(좌)에는 모래를, 다른 쪽에는 양토를 채워둔다. 그리고 지하

수면이 상자의 아래쪽에 있고, 토양수는 평형상태에 있다고 가정한다. 이때 강우를 양쪽 흙 위에 발생시키면, 유출은 이상하게도 양토층 쪽에서 생긴다. 유출은 투수계수가 큰 모래에서는 없고, 입자가 가는 양토층에서 발생한다. 확실히 포화투수계수는 모래층이 크지만, 불포화상태에서는 양토층이 물을 통과시키기 쉬웠다.

B. 맨땅보다 초지가 건조하다.

마찬가지 모순으로, 초지의 토양쪽이 맨땅의 토양보다 건조하다는 사실이다. 흔히 바로 건조한 맨땅을 생각해서 필자가 잘못 생각하고 있지 않을까 하나 그렇지 않다. 단순히 지표면만을 보면 맨땅쪽이 훨씬 더 건조하다. 하지만 지표면이 건조함에 따라 불포화상태가 되고 투수계수가 급하게 저하하며, 하층의 수분은 지표면을 통하여 빠져나가기 어렵게 된다. 한편 초지는 식생이 있는 토양의 경우에는 뿌리가 발달해서 토양의 투수성을 높이고 침투한 수분도 의외로 빠르게 지하수면으로 도달하는 반면 뿌리가 증발산작용으로 흙의 깊은 곳에 있는 수분도 운반해 나간다. 두개의 소형 삼투계를 만들고 같은 모형으로 양토를 채운다. 한 쪽의 삼투계는 풀이 자라도록 하고, 다른 쪽은 맨땅 그대로를 유지한다. 1, 2개월 후, 풀의 뿌리는 충분히 성장하고, 토양특성은 크게 바뀌어진다. 따라서 같은 양의 강우에 대하여 맨땅에서는 지표면류가 발생하게 된다. 물론 초지에서는 지표면류가 발생하지 않는다. 그러나 지하수 유출은 초지쪽이 먼저 시작한다. 지하수유출은 증발산이 많은 것과 뿌리에 따르는 침투수류 때문에 초지쪽이 많게 된다. 그리하여 토양은 초지쪽이 언제나 먼저 건조하게 된다. 초지쪽이 맨땅보다 강우로 빠르게 습해지고, 빠르게 건조한다는 것은 매우 흥미로운 사실이다. 삼림이 유출을 증가시키고 감소시키냐에 대해서는, 오랫동안 논쟁이 계속되고 있다. 확실히 삼림을 벌목한 후에도 수년간은 그 뿌리가 남아 있다. 토양상태는 삼림이 있을 당시와 같으므로, 침투는 크다. 그러나 삼림을 벌채하였으므로 증산이 없으며, 따라서 일시적으로 유출율이 높아진다. 그후 지층토양은 씻겨지며, 산은 황폐하고 산허리는

물을 확보하는 능력을 상실하여 홍수시에는 한꺼번에 유출이 발생하게 된다. 이에 관하여 도오교 노고(農工)대의 오오다(太田猛彦)는 흥미있는 연구를 하였다. 즉, 유출이나 보수라는 면에서 삼림을 생각할 경우, 삼림은 산허리 사면의 아랫쪽에 있는 경우가 가장 효과가 있다고 한다.

C. 유출율과 초기 수분량

그런데 유출율이 무엇에 의하여 결정되는가 하는 것은 오랫동안 의문점이였다. 여러가지 주장이 있지만 필자는 이것이 하천의 초기유량(홍수가 시작하기 직전의 유량)에 지배되는 것으로 생각하고 있다. 이것은 초기유량이 지하수위나 토양수분량의 상태를 나타내는 지표라고 생각하기 때문이다. 이점을 확인하기 위하여 연직 일차원 침투에 의한 유출실험을 하였다. 그 결과, 유출율은 강우강도(극도의 다우 경우 제외)나 강우량에는 의존하지 않고, 초기 수분량만에 의하여 결정된다는 것을 알았다. 보다 일반적으로 말하면 - 유출율이라기 보다는 - 손실율은 초기 수분량에만 영향을 받는다는 것이다.

유출은 측방류 등 횡방향의 흐름에 의해 발생하는 데, 강우는 먼저 연직으로 토양에 침투한 후, 불투수 또는 난투수성의 지층에 도달하고, 그후 측방류가 되어 조속히 유하함으로써, 위의 결론이 실제의 경우에도 잘 적용될 수 있을 것으로 생각한다.

D. 빠른 지하수유출

강우 후, 계곡의 하천수는 급격하게 증가한다. 이

와 같은 사실은 오랜기간 동안, 강우의 대부분이 표면류라고 생각하였기 때문이다. 하지만 실제로 산지 등에서의 표면류 발생은 거의 나타나지 않는다. 그래서 얇은 토양층에서 측방류(Through Flow)의 발생이나 복귀류(Return Flow)의 발생이 주목되고, 전술한 바와 같이 'Partial-Source-Area'의 존재를 알게 되었다. 하지만 급격한 유출이 왜 생기는가에 대해서는, 현재 여러가지 이론과 설명이 제시되고 있다.

현재로서는 토양중, 특히 난투수성의 지층 위에 자연적으로 발달해 있는 유공관형태 흙의 수리작용과, 거의 포화에 가까운 상태에 있는 불포화대(Tension Saturated Zone)가, 극히 작은 강우의 침투에 의해 포화대로 되어, 옛 강우(Pre-Event Water)가 지하수류로 유출된다는 삼입작용(Displacement)설이 유력하다.

○ 후 기

본 논설을 공동집필한 히노교수는 다음과 같은 인삿말을 전하여 왔다. “그 옛날 일본의 나라(奈良), 헤이안(平安)시대 당시, 한국은 우리들의 스승이기도 하고, 형이기도 하였다. 그 후 몇번 불행한 시대가 있었지만, 재차 그와 같은 일이 없도록 학문의 세계에 있어서는 교류를 긴밀하게 하고싶은 마음 간절하다. 본 논설을 끝까지 읽어주신 한국의 수문학자님들께 감사한 마음을 전한다.”