

19 世 紀 的 水 文 學

이 논문은 월간 기술지 "Water Power"의 1969년 1월호에 공학박사 Asit K. Biswas씨가 기고한 "A history of hydrology in the Nineteenth Century"를 번역한 것임.

19세기에 있어서 수문학 분야의 급격한 지식 성장은 괄목할만한 것이었다. 경험에 의한 수문 분석방법은 이미 17세기에 Perrault, Mariotte 및 Halley에 의하여 개척되어 널리 보급되어 있었고 19세기 수문학의 발달은 주로 지하수문과 지표수 측정분야에 집중되었다.

불란서 학계는 현금에 이르기까지 수문 및 수리학 연구분야에 주도적 역할을 하여 왔으나 불란서 혁명 당시에는 매우 큰 타격을 받았었다. 혁명정부는 1793년에 Lavoisier, Bailly 및 Cousin 등의 과학자들에 의하여 운영되었던 과학학술원을 폐쇄하였고 이 때문에 Condorcet가 자살하는 등의 사태가 벌어졌다. 다행히 혁명정부는 그 잘못을 깨닫고 망명했던 Du Buat와 같은 사람들을 본국에 돌아오게 하여 훌륭한 업적을 남기도록 하였다. 수문학과 밀접한 관계를 가지고 있는 타분야들에 대해서는 그 업적이 이미 잘 알려져 있으므로 이들과의 중복을 피하기 위하여 여기서는 보다 간단하게 설명하기로 한다.

유량의 산정

19세기 초기에는 Du Baut의 유속공식이 널리 보급되었으며 Chezy의 공식은 거의 알려지지 않았었다. 이 시기의 주제는 유속과 마찰저항의 함수관계였다.

19세기의 유량공식의 기본이론은 1800년에 발표된 Coulomb(1736~1806)의 논문에 기초를 두었다. Coulomb은 여러 종류의 액체속에 낚시줄 끝에 매달은 원반을 여러가지 크기별로 담가 이를 회전시키고 회전원반의 진폭의 감소비율을 측정하여 저항법칙을 유도하였다.

이 정밀한 실험은 통하여 Coulomb은 저항을 두개의 항 즉 속도함파와 속도의 제곱항으로 나타낼 수 있다는 결론을 얻었다. 이와 똑같은 개념은 개수로에서 유속을 나타내기 위한 방정식에도 적용되었으며 불란서의 Prony(1755~1839)와 Girard(1765~1836) 및 독일의 Eytelwein(1764~1848) 등은 이 방법의 선구자였다. 또 Courtois, Lahmeyer 및 Venant 등은 이 분야에 있어서 공로자였다. 일반식은 다음과 같이 표시되었다.

$$RS = aV + bV^2$$

여기서 R : 동수반경 또는 동수평균심

S : 구배

a, b: 상수

V : 유속

하천유량의 측정에 있어서는 유량은 유수단면적에 유속을 곱한 것과 같다($Q=AV$)고 생각한 이태리의 Castelli가 세운 개념이 커다란 지침이 되었고 이에 의하여 상당한 정도의 유량측정이 가능하였으나 이 측정방법의 발달은 비교적 느린 것이었다. Nile강의 홍수위에 대한 기록을 B.C. 3000~3500년 경의 초기문명중에서도 찾아볼 수 있지만 정기적인 수위관측에 관심을 모으기 시작한 것은 18세기초부터였다. 일반적으로 17세기 이전의 하천유량 기록은 양적인 것이 아니고 물질적인 것이었다. 일례로서 563년의 Rhone강, 572년의 Loire강 및 583년의 Seine강에 대한 간단한 홍수 기록은 주로 재산과 인명 및 가축에 대한 피해에 관한 것이었다.

초기의 하천유하량 분석자중 독일의 수문관측자였던 Berghaus는 다음 지점들에서 최고수위, 최저수위 및 평균수위를 검토하였다.

(가) Rhine강의 Emmerich지점 (화란국경).
1770~1835(66년간)

(나) Rhine강의 Cologne지점 : 1782~1835(54
년간)

(다) Elbe강의 Magdeburg지점 : 1728~1835
(110년간)

(라) Oder강의 Kustrin지점 : 1778~1835(58
년간)

그후 Elbe강의 Magdeburg 지점에서의 1727년
부터 1839년까지 113년간에 걸친 수위관측기록
이 1870년에 발견되었고 이것을 다시 “프러시아”
의 수리기술자인 Mass가 분석하였다.

Wex는 중부유럽 다섯개의 주요하천의 수위를
상세하게 분석하고 하천유하량이 장기간에 걸쳐
서 계속적으로 감소하고 있다고 지적하였다. 그
러나 그는 Danube, Rhine, Elbe 및 Vistula강의
저수위가 하상까지 떨어지리라고 생각하지는 않
았다. 그 이유로서는 Danube강이나 Rhine강의
유하량 일부는 “알프스”산의 얼음과 눈으로 공
급되고 아마도 유량감소를 초래하고 있는 원인
은 어떤 한계점을 초과하지 못할 것이며 또한
여러 지류는 일반적으로 최고수위와 최저수위의
발생시기를 각각 달리하고 있기 때문이었다.

이러한 발생시기의 차이가 하천유량에 미치는
영향을 분석하는 것은 매우 힘든 일이었다.
거의 모든 지류마다 상시유량의 변화가 각각 상
이한 시기에 일어나고 있기 때문이었다. 후에
자료분석을 하여 수위기록을 계통적으로 보정하
여 주었으니 유량의 점진적 감소의 이론은 무시
될 수 있었다.

Javis는 622년부터 1926년까지 Roda Nilome-
ter로서 측정된 Nile강의 최고 및 최저수위를 도
표로서 표시하였다. 이 자료는 16세기와 17세기
의 일부를 제외하고는 완전히 합리적인 것이었
으며 이것은 1세기간의 평균퇴사가 10~15cm 정
도가 되고 있음을 보여 주고 있다.

Kolupaila는 1812년부터 1930년까지 Lithua-
nian 수문관측기관에서 측정 수집한 Memel강의
수위기록을 종합 검토하여 Schmallenigken 지
점에서의 장기 수위기록치를 산출하려고 시도하
였으며 18세기와 19세기의 수위측정에 관한 상
세한 내용은 Kolupaila와 Miami Conservancy
District에 의하여 작성되었다.

19세기의 초기부터 유량을 체계있게 관측하기
시작하였다. 이들중 괄목할만한 것은 다음과 같
다.

(가) Von der Linth(1767~1823)

Rhine강 상류의 Basle 부근 : 1809~1821
(13년간)

(나) Defontaine(1785~1856)

Rhine강과 그 지류 : 1820~1833(14년간)

(다) Ventroli(1768~1846)

Tiber강의 Rome 지점 : 1825~1835(12년
간)

(라) Baumgarten(1805~1856)

Garonne강 : 1837~1896(60년간)

이 유하량 기록들은 이 시기에 널리 퍼졌든
여러가지의 구배—유속공식에 의하여 계산되었
으며 1867년 11월에 Rhine강의 Basle에서 처음
으로 국제적인 유량측정이 서정되기 시작하였다.

Kraijennhoff(1758~1840)는 1813년에 화란 전
역에 걸쳐 총괄적인 수문과 지형관계표를 작성
하여 출간하였다. 이것은 수면구배와 수위 및
유속을 이용하여 계산된 상세한 유량자료를 제
공하고 있으므로 매우 가치있는 것이었다. 유속
은 수면부터 거의 하상까지 수직으로 세운 막대
기둥을 한 단면에서 다음 단면까지 흐르는 시간을
 잴으로써 측정되었고, 수위측정 기준은 전부 통
일 표준치를 적용하였다.

지 하 수 문

지하수 분야에 있어서 지질학 이론을 수문학
에 응용하기 시작한 것은 영국의 Smith였다.

1769년에 Oxford주의 Churchill에서 태어난
Smith는 그의 훌륭한 선배들이 많이 있는데도
불구하고 현재 영국 지질학계의 시조로 지칭되
고 있다. 그는 자기 자신이 지질학자임은 물론
광물학자와 토목기술자임을 자부하였고 재산의
대부분을 지질도의 발간에 소비하였다.

Smith가 수문학의 발전에 공헌한 것은 주로
지하수의 분야에 한한 것이었다. 1827년에 Yor-
kshire Philosophical Society에 제출한 “암층 저
류수의 하기(夏期) 이용”이라는 제목의 논문에서
그는 Scarborough읍의 지하수 이용에 관해서
기술하였다. 이 논문은 수원보존의 필요성으로

부터 시작하여 이 읍의 하기용수를 증가시키는 방법에 대해서 논하였다.

Smith는 이보다 몇년 앞서 배수를 위한 우물을 파 보았더니 오히려 물이 조금 나오는 것을 발견하였다. 계속해서 9~10ft 길이로 개수로로 굴착하였더니 양수량은 시간당 약 24 hogshhead (1,260 gallon)만큼 되었으며 이에 힘입어 다시 이 개수로로 4ft 더 굴착하였더니 양수량은 시간당 50~60 hogshhead만큼 증가하였다. 그는 이와 같은 지하수는 피압대수층에서 유출되는 것으로 추정하였고 이 읍의 여름철 용수공급을 위하여는 여기서 나오는 물을 뱀을 축조하여 저류시켜서 해결할 것을 건의하였다. 이 읍의 여름철의 용수 수요량은 겨울철의 수요량을 능가하는 양이었다.

대수층은 황색의 세립사질의 부서지기 쉬운 사암으로 구성되어 있었는데 이것은 지표면에 구멍이 많고 대수층 실도는 매우 깊었다. 직경 6ft, 길이 4ft 되는 웅덩이를 부근의 암벽으로부터 6ft 떨어진 곳에 파고 유출되는 물을 모았으며 그 하루에 관을 부설하여 상수도용 저수지에 연결시켰다.

이 집수정으로 부터의 유출량을 용수수요에 따라 조절하기 위하여 Smith는 길이 12inch 되는 관을 Pipeline의 말단에 수직으로 세우고 이를 필요에 따라 폐쇄시킬 수 있도록 하였다. 겨울철에 이 수직관의 꼭지를 밀폐하였더니 집수정의 수위가 예상했던 것보다 14~10ft 더 상승하는 결과를 발표하였다.

이론적 기초

지하수 부문에 있어서의 이론적인 기초는 “Dijon 생활용수의 공급계획에 대한 설계 및 시공 보고서(1855년 발간)”에 기술되어 있는 Darcy (1803~1858)의 이론에 근원을 두고 있다.

Darcy는 이 보고서중의 부록으로 수록한 “모래층 여과에 의한 정수(淨水) 기술”에서 오늘날 Darcy의 법칙으로 알려진 다음 공식을 발표하였다.

$$Q = \frac{KA}{L}(H + L)$$

여기서 L : 투수층의 길이

A : 투수 단면적

K : 상수

H : 투수단면 이상의 수심

유속 V는 $\frac{Q}{A}$ 와 같으나 그는 유속과 공극률의 개념을 도입시키지 않았다.

Darcy는 현장조사와 실험실내에서 정밀한 실험을 통하여 그 상관성을 규명해야 할 필요성을 강조하였으며 그가 가장 흥미를 느꼈던 문제는 집수정의 양수량 증가의 가능성 조사에 관한 것이었다. 그후 그는 투수시험을 제외하고는 지하수문학 분야에 대해서 더 이상 연구를 계속하지 않았다. 그는 강수가 불과 몇 feet 밖에 흡수에 침투하지 못한다는 가설을 긍정하지 않았다. 따라서 집수정으로 부터의 유출량이 계절적으로 변화하는 현상을 합리적으로 설명할 수 있었다.

지하수에 관한 Darcy의 이론은 Dupuit(1804~1866)에 의하여 확장되었으며 투수층에서 대칭적으로 유입하는 집수정의 유량공식은 현재 Dupuit의 이름을 따서 불리워지고 있다. 이 집수정에 관한 문제는 투수에 관한 내용을 포함한 1865년에 발표했던 그의 논문내용중 일부로서 취급되었다. 그는 침투에 관한 Darcy의 이론을 충분히 이해하고 있었으며 개수로에 대해서 Prony가 이용한 바 있는 Coulob의 저항법칙을 기초로 하여 이 문제를 해결하려고 하였다.

Dupuit는 투수층을 미세한 수로의 모임으로 간주하여 Prony 공식을 적용하였다. 이 미세수로는 모두 똑 같은 조건을 갖고 따라서 임의의 일 단면에서의 이 미세수로는 어느 점에서나 똑 같은 유속을 갖는 것으로 가정하였다. 투수층을 통과하는 물의 유속이 아주 느리므로 Prony 공식에서 V²의 항을 무시하면 침투에 관한 식은 다음과 같이 표시된다.

$$i = n \sqrt{\quad}$$

여기서 n는 흙의 성질에 따라 변하는 상수이며 이론적인 표현은 Darcy의 경험식과 유사하다.

Dupuit는 집수정이 대수층의 원통으로 둘러싸인 것으로 간주하여 이에 유입하는 물의 양을 다음과 같은 이론식으로 표시하였다.

$$q = K \left(\frac{H^2 - h_0^2}{\log \frac{R}{r_0}} \right)$$

여기서 q : 단위시간당 유입량(양수량)
 K : 투수계수
 H : 영향권 밖의 지하수면으로부터 불투수층 까지의 깊이
 h_0 : 집수정의 수심
 R : 영향권의 반경
 r_0 : 집수정의 반경

그는 또한 지하수의 함양과 찬정(鑿井)에 대해서도 실용에 가까운 공식 두개를 유도하였다.

이상 세가지 공식은 다음 두가지의 기본가정 아래 성립한다.

(1) 임의의 일단면에서는 어느 점에서든 동수구배가 같다.

(2) 어떤 점에서의 피압수면의 동수구배는 그 점의 표면구배와 같다.

이상 두가지의 가정은 Dupuit 공식의 적용범위를 크게 제한하는 것이었지만 항상 Dupuit는 기본가정에 개의하지 않았다. 그는 Darcy와는 달리 그의 이론식을 뒷받침하기 위하여 현장이나 실험실에서 충분히 실험하지 않았고 또한 영향권의 반경 R 에 대하여 어떠한 기준치를 제시하지 않았다. 아마도 투수층에서의 R 값은 무한한 것으로 주장하여 이 공식의 사용을 곤란하게 하였을 것이다. 그후 Thiem이 실제조사를 통하여 합리적인 R 의 값을 제시하였다.

집수정에 있어서 비록 피압수면에 대한 가정이 확실하지 않았고 불투수층의 면에 기준을 둔 피압수두의 배분이 이론적으로 정확한 것도 아니었지만 Dupuit의 업적은 지하수문학 분야에 커다란 발전을 가져오게 했다. 어쨌든 그의 공식은 실제의 값과 계산치 사이의 차이가 극히 작기 때문에 현재까지 양수량과 투수계수를 산정하기 위하여 사용되고 있다.

불란서에서 이룩한 Darcy와 Dupuit의 선구자적 업적은 후에 독일과 오스트리아에 계승되었다. 독일에서 지하수 문학 분야에 가장 훌륭한 공적을 쌓은 사람은 Dresden시의 토목기술자였던 Thiem(1836~1908)이었다. 그는 집수정과 찬정 및 집수암거의 유입에 관한 문제를 이론적으로 분석하고 이를 1870년의 논문에 발표하였다.

Thiem은 Dupuit의 공식과 똑 같은 집수정과 찬정에 대한 유량공식을 유도하였는데 그가 이

공식을 유도하기 위하여 세운 가정 역시 Dupuit의 것과 마찬가지로 불완전한 것이었다. 아마도 이 두 사람은 이 두가지 조건을 단순하게 간략화한 가정으로 생각한 것이 아니고 이론적인 것으로 생각했던 것 같다. 이 논문에서 Thiem은 일부분만이 투수하는 집수정에 관한 문제도 취급하였는데 그는 이것을 너무 간략화한 나머지 부분적인 불투수가 정호로부터의 양수량에 미치는 영향은 대단히 작다는 그릇된 결론을 내렸다. 그는 또한 난류성 침투의 문제를 분석하려고 시도하였으나 그가 시인한대로 그 결과는 실용가치가 별로 없는 것이었다.

그 이후에 Thiem은 광범위한 현장관측을 통하여 그의 공식을 뒷받침하였다. 그는 투수층에 있어서 영향권의 반경을 무한대로 취할 필요가 없음을 시사하였다. 양수로 인한 지하수 위의 변동량이 양수량의 정확도에 미치는 범위만을 영향권으로서 취하면 충분하다는 결론을 내렸다.

지하수의 유량을 측정하기 위하여 Thiem은 투수층의 시점에 물감을 주입하고 집수정에 이것이 나타나는 시간을 재서 유속을 측정하려 하였다. 그러나 이 방법은 정지상태의 물에서도 물감이 확산되는 경향이 있어서 정확하지 못한 것으로 나타났고 후에 그는 염분용액을 주입함으로써 이를 측정하는 방법을 강구하였다. 그는 정수층에 농도를 아는 염분용액을 주입하고 일정시간 후에 여러 지점에 나타나는 농도를 측정하였다. 이렇게 하여 작성한 염분함유량 보정표를 이용하여 그는 주입지점으로부터 일정거리에 있는 집수정에 투과 도달하는 지하수의 유속을 보정할 수 있었다.

Thiem은 지하수문학 분야에 대하여 광범위한 논문을 발표했다. 그가 실험기술을 크게 발전시키고 이론과 실제를 결합시키려고 노력한 것은 가장 큰 공헌이라 하겠다.

Vienna의 Forchheimer (1852~1933)도 지하수 이론에 크게 공헌했는데 그는 이 분야에 수학적 원리를 처음으로 도입하였다. 일찌기 Daubrée (1814~1896)도 또한 지하수에 대한 논문을 발표하였다.

Beardmore와 수문편람

1862년에 수문편람(Manual of Hydrology)이 Beardmore에 의하여 발간되었으며 이것은 오늘날의 수문학에 가까운 것으로서는 영어로 된 것 중 맨 처음의 것이었다. 이 책은 1850년에 발간된 수리표(Hydraulic Tables)의 증보 및 수정판이었다. Beardmore는 1816년에 영국의 Nottingham에서 태어나서 철도, 항만, 교량, 배수 및 급수설비 등의 계획 및 설계업무에 종사하였다. 그는 1861년에 왕립기상협회의 회장으로 선출되었고 Edinburg, Glasgow, Moscow 및 Odessa 등지에 까지 손을 뻗쳐 이러한 도시들의 용수공급 계획에 대한 고문이 되었다.

Beardmore는 어떤 새로운 수문학의 원리를 제시하지는 않았으나 수문분야의 많은 지식을 일람표 형식으로 훌륭히 편집한 책을 출간하여 이를 보급하는 공헌을 하였다. 수면구배나 물의 속도 특히 어떤 주어진 강우와 유속이 하천유량에 미치는 영향 등에 관한 문제가 이 책이 발간되기 전까지는 어떤 보정을 가할 필요성이나 실제 응용상의 문제로서 취급된적이 거의 없었다. 또한 강우량이 용수원이나 용수공급의 문제에 미치는 영향은 오직 수로나 상수도 기술자에 의하여만 취급되어 왔고 수년동안 부단한 노력으로 얻은 이들의 실제 경험은 발표될 기회가 거의 없었다.

Beardmore는 다음과 같이 경험의 중요성을 강조하였다. 즉 "수문학은 기후에 대하여 고려하여야 할 뿐만 아니라 지표면의 고도와 경사도 및 지층의 지질학적 구조 등 광범위한 조건을 포함하고 있다. 따라서 일례를 들어 배수나 급수설비 등 수문학을 응용하여야 할 구조물을 건설하려고 할 때 이 학문에 대한 많은 경험이 필요하다.

이 책은 일상 매우 편리하게 사용할 수 있도록 편찬되었으며 현재 사용되고 있는 King의 수리학 편람(Handbook of Hydraulics)와 전신어라고 할 수 있는 것이었다. 그는 이 책을 (1) 수리 (2) 하천과 유량 (3) 조수 (4) 강우의 네 부분으로 나누고 또한 영국의 Consulting Engineer들이 19세기 후반에 국제적인 수자원 개발사업

의 계획과 설계업무를 다루는데 이용할 수 있도록 세계 각처의 수문자료를 수록하였다.

수문학의 발달에 있어 일반적인 유량공식의 안출은 Du Buat에 의하여 시작되었으며 그의 이러한 노력은 19세기 후반을 향한 거모였다. 미국의 West Point Andrew를 졸업한 Humphreys(1810~1883)와 Abbot(1831~1927)도 또한 초기의 선구자로서 손 꼽히고 있다. 그들이 행한 1851년부터 1860년까지의 Mississippi 삼각주 지역조사는 하천조사로서 처음 수행된 것은 아니었지만 그때까지 시행한 것중 가장 규모가 큰 조사였다. 610페이지에 달하는 보고서를 1861년에 발간하여 즉시 Best Seller가 되었고 이중 많은 부분은 번역되어 여러 외국에 소개되었다. 또한 Kolupaila는 이것에 대하여 39종에 달하는 검토 보고서와 논고를 작성하였는데 이중 18종은 외국어로 작성한 것이었다.

Humphreys와 Abbot는 유속측정시 이중부자를 사용했으며 같은 수위에 대하여 수위 상승시와 하강시는 그 유량이 20%까지 변한다는 점을 알았다. 수위유량관계는 평균유속 산출법을 적용하여 결정하였다. 그들은 거대한 Mississippi강으로부터 Du Buat시대의 소수로에 이르기까지의 관측결과에 기초를 둔 복잡한 유량산공정식을 발표하였다. 이 공식은 많이 사용되지도 않았고 조도계수에 대하여 고려하지도 않았지만 이것이 내포하고 있는 합축성은 꼭 중요한 것이었다.

Darcy와 그의 조수 Bazin(1829~1819)은 Dijon 부근에서 연장 595.5m되는 수로에 대하여 구형 제형, 삼각형 및 반원형의 콘크리트단면을 흐르는 유량을 측정하여 그 결과를 1865년에 발표하였다. 그는 다음과 같은 유량계산식을 제시하였다.

$$C = \frac{1}{a(1 + \frac{b}{R})}$$

Humphreys와 Abbot는 후에 그들이 세운 공식의 타당성을 검토하기 위하여 Swiss 기술자인 Ganguillet(1818~1894)와 Kutter(1818~1888)를 초청하였다. Ganguillet와 Kutter는 Swiss에서 자신들이 측정한 결과와 기타의 자료를 분석하여 다음과 같은 결론을 내렸다. "이 두가지 식

은 모두 일반적으로 사용할 수 없는 것이다. Bazin식은 Mississippi강에 적용할 수 없고 Humphreys-Abbot식은 구배가 심한 수로에 대응하여 적용할 수 없다. 후자가 일반화할 수 없는 식인 반면에 Bazin식은 단순히 구배의 영향만을 고려하면 일반적으로 적용할 수 있는 공식의 기초를 이루고 있다” Ganguillet와 Kutter는 다음과 같은 공식을 제시하였다.

$$C = \frac{41.65 + \frac{0.00281}{S} + \frac{1.811}{n}}{1 + \left(41.65 + \frac{0.00281}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}} \quad (\text{영국단위})$$

이 식은 즉시 인정받았고 이 논문을 실은 1859년의 잡지는 즉시 매진되었다. 이 논문의 증보판이 1877년에 단행본으로 발간되었으며 이 책은 곧 여러 외국에 번역 소개되었다.

이 복잡한 공식은 “어느 경우에도 이용할 수 있는 식은 필연적으로 복잡성을 지닌다”는 표현으로 이 식의 창시자들로부터 그 정당성을 인정받았다. 또한 이 공식은 내포하고 있는 근본적인 결점에도 불구하고 세계 각책에서 이를 받아 들었다.

Manning(1816~1897)은 Ganguillet-Kutter 공식의 동차성(同次性)의 결여를 지적하였다. 그의 논문은 그가 본래 수문학자였다는 것을 분명히 말해주고 있다. 1851년 5월에 발표한 그의 첫 논문에서 배수시설을 할 경우 그 영향으로 홍수의 도달시간이 줄어들고 따라서 최대유량이 증가하며 이 최대유량은 강우 및 유역의 크기와 상황에 관계되는 것이라고 지적하였다. 그는 4~10년간의 강우기록을 근거로 하여 Ireland의 5개지점에 대한 일최대유량을 산정 발표하였다. (그러나 이것은 발표한 해와 그 이듬해(1852)의 기록에도 미치지 못했다) 어쨌든 이것은 홍수량 계산에 있어 현재 성행하고 있는 이론적 방법의 시초였다.

그 후에 발표한 논문에서 Manning은 수문학 연구가 충분히 뒷받침할 필요가 있는 학문임을 증명했다. 즉 “토목기술자로서의 전문직업에 종사하는데 있어 필수적인 여러 과목중에서 수문학의 범위에 들어가는 과목보다 더 중요한 것은 없다”고 하였다.

같은 논문에서 그는 하천과 수로에 대하여 여러 가지 경험적 관측결과를 분석하고 $V = CS^{\frac{1}{2}}R^{\frac{2}{3}}$

의 형식으로 충분히 정확한 유속을 계산할 수 있다는 것도 발표하였다. 아마도 Manning은 그보다 약 20년 앞인 1858년에 Gauckler(1826~1905)가 그에 근사한 공식을 발표했었다는 사실을 알지 못했을 것이다. 그러나 Manning은 이 식이 차원적으로 일치하지 않고 또한 2/3와 같은 수가 실지 사용에 있어 너무 불편하다는 점에서 원칙적으로 이 공식에 큰 기대를 걸지 않았다. 그는 오늘날 Manning 공식으로 불리워지는 이 공식을 버려두고 새로운 공식을 발표하였다.

$$V = C \sqrt{Sg} \left[R^{\frac{2}{3}} + \frac{0.22}{m^2} (R - 0.15m) \right]$$

여기서 C: 하상의 성질에 따라 변하는 계수 (Chézy식의 C와 다름)

m: 대기압에 해당하는 수은주 높이

이 식에 있어서 대기압을 유속공식에 포함시킨 것은 놀랄만한 것이었다. Manning은 사실이 그런 것 처럼 물리적 성질의 표현에 있어서 차원의 문제를 잘 알고 있었으며 유속공식에 있어 그는 단지 m의 항을 포함시킴으로써 해서 이러한 필요조건을 충족시킬 수 있었다. 그 다음에 그는 Du Buat가 그렇게 생각했던 것 처럼 매우 작고 거의 상수에 가깝거나 제곱근과 같은 계수는 보편적으로 무시할 수 있는 함수로 결론을 내렸다. 이 식은 관수로의 유량계산에 대기압의 영향을 고려함으로써 해서 정확한 결과를 가져다 주었다. Manning은 그후 개수로로는 물론 관수로의 유속산정에 있어 일반식이 될 수 있는 공식유도를 위한 연구를 계속하였다.

Manning은 그의 일반식 원성의 노력에 4년을 바쳤지만 공교롭게도 현재에는 그가 실용성이 희박한 것으로 생각하고 버렸던 식과 더욱 밀접한 관계를 맺고 있는 것이다.

이론식의 발달

홍수량 계산에 있어 처음으로 이론을 도입시킨 것은 아마도 1842년부터 1847년까지 조사를 수행한 Ireland의 기출자 그룹이었다. 이 방법은 간단히 이야기 해서 최대 일유량 기록치중 유출되는 수량만을 통과시킬 수 있는 배수로를 설계하는 합리적인 것이었다. 이것은 전 강우량을

증발, 침투 및 유출의 3가지 지배적 요소로 나누고 증발과 침투에 의한 손실은 년중 일정하다고 생각한 것이었다. 따라서 그들은 년강우량중 유출되는 량을 위와 같은 방법으로 산출하고 일우량 역시 그와 같은 비례로 유출되는 것으로 판단하였다.

Dooge가 기술한 바에 의하면 Roberts는 1843년 12월에 발표한 Deco강에 대한 보고서에서 최대 일우량을 1.6inch로 잡았고 유출계수를 0.4로 취하였다. 그 후에는 유출계수를 유역의 여러가지 특성에 따라 다르게 취했고 이러한 유역특성의 가장 큰 요소는 경사도로 생각했다. 경사가 심한 유역은 침투 및 증발손실을 허용할 수 있는 시간이 단축되기 때문에 유출율이 높은 것으로 간주했다. 가장 적절한 유출계수는 평지에서 0.4 또는 1/3 그리고 경사지에서 0.6 또는 2/3로 취했다.

최대 일우량은 처음에 1.5~1.6 inch 정도로 취했으나 후에 점점 증가되었고 Manning은 어떤 지역에서는 이것이 2 inch까지 되고 있음을 지적하였다. 이와 같이 하여 1847년까지 홍수량 계산식은 다음과 같이 표시되었다.

$$Q = 2.52 CIA$$

여기서 Q : 계획홍수량(ft³/min)

C : 유출계수(평지에서 1/3, 경사지에서 2/3)

I : 최대 일우량(1.5~2 inch)

A : 유역면적(acre)

오늘날의 합리공식의 기초는 1851년에 발표한 Mulvaney(1822~1892)의 논문에 근거를 두고 있다. 그는 최대유량은 강우와 유역상황의 조합이 2,3년 동안에 한번 이상 일어나지 않을 조건이 되었을 때 발생한다는 것을 강조하고 이 두가지 조합의 상관성을 결정하기 위하여는 장기간에 걸쳐 강우강도와 강우량 및 하천유량을 측정해야 한다고 지적하였다.

Mulvaney의 공적은 합리공식에 응용되고 있는 도달시간의 개념을 처음으로 도입한데 있다. "작은 산지유역에 있어서 확인해야 할 가장 중요한 요건은 일정강우가 등분포로 지속하는 동안에 홍수가 최대에 달하는 시간을 구하는 것이다. 유역내에 내린 강수가 동시에 한 지점에 도달할 때 유량이 최대가 될 것이므로 가장 먼 거

리에 내린 빗물이 도달하는데 필요한 시간을 가정해야 한다. 따라서 강우의 강도 및 지속시간과 도달시간이 분명해지면 어떤 기간의 최대 등분포우량의 발생조건하에서 극대 홍수량을 구할 수 있다"

"이 도달시간의 문제는 주로 유역의 크기 및 형상과 표면경사도에 따라 변화한다. 그러므로 이에 대한 조사대상으로서는 이러한 지형조건과 이 조건들이 도달시간에 어떤 영향을 미치는가 하는 것이다. 어떤 유역의 크기와 형상 및 평균구배를 알면 최대유량을 이르킬 일정강우의 지속시간과 따라서 이 경우에 적용할 수 있는 최대우량을 결정할 수가 있다"

유출계수 C는 주로 유역내 토양의 저류능력과 경작지의 분포상태를 조사하여 결정지을 수 있다. Mulvaney는 작고 대표적인 유역들을 골라 일련의 조사를 시행하여 홍수에 영향을 줄 여러가지 요인을 검토해야 됨을 시사했다.

이장과 같이 합리공식의 개념은 Mulvaney의 논문에 명확하고 함축성있게 제시되었다.

이 논문에서 Ireland 기술자인 Mulvaney는 소요액 £2인 자기우량계(£1은 우량계기대금, £1은 시계대금임)에 대해서 설명을 덧붙였다.

그 이후 Kuichling, Chamier 및 Lloyd-Davis가 각각 1889년, 1898년 및 1906년에 이 합리공식의 사용을 추천하였다. 현재는 이 공식은 자기 나라에 이를 소개한 사람의 이름을 따서 미국에서는 Kuichling공식 그리고 영국에서는 Lloyd-Davis 공식으로 알려졌다. 이것은 사실은 국제적으로 Mulvaney 공식으로 알려졌어야 했을 것이다.

기타 부문의 발전

- Venturoli(1768~1846), Bidone(1781~1839) 및 Lombardini(1794~1878) 등은 19세기 이태리 수문학자들중 가장 뛰어난 인물들이었다. Bidone는 처음으로 조수(跳水)현상을 체계있게 분석하였으며 Venturoli는 1823년에 구형단면의 수로에 있어 기초적인 배수곡선식을 유도하였고 또한 Tiber강의 수년간 유량을 분석하였다.

Lombardini는 Po강의 수문과 여러가지 홍수 조절계획을 검토하였다. 그는 산림의 벌채로 인

하여 지표면 유출속도가 증가하고 따라서 홍수량이 증가할 것이라고 지적하였다. 그리고 그는 이태리의 여러 강의 월별 유하량을 체계있게 분석하였다.

원관을 통하여 흐르는 유수에 대하여 Hagen-Poiseuille식이 19세기에 유도되어 지하수문학의 분야에 기여하게 되었는데 이는 독일의 수리기술자 Hagen(1797~1884)과 불란서의 물리학자 Poiseuille(1799~1869)에 의하여 거의 동시에 경험적으로 유도되었다. 이와 때를 같이하여 1858~1860년 사이에 물리학자인 Neumann(1817~1895)과 Hagenbach(1830~1910)가 다시 독립적으로 이론식을 유도하였다. 층류에서의 저항법칙을 Poiseuille의 이름을 따서 명명한 사람이 Hagenbach였는데도 이들 식이 유도된 시기를 아직까지 동일시 하고 있는 점은 약간 불공평한 일이라 할 수 있겠다.

유럽의 기상학자 Symons(1838~1900)와 Hellman(1854~1939)은 우량관측에 있어 체계를 세우려고 노력하였으며 그들은 기상학의 범위내에서 여러 부분의 발전에 크게 공헌했다. Symons는 영국 전역의 다양한 우량관측 결과를 서로 상관시키는데 거의 40년을 보냈다. 1860~1861년 사이에 “영국의 강우”를 발간하게 된 것은 순전히 그의 노력의 결과였으며 그후부터 정기적으로 년간강우기록이 발간되기 시작하였다.

제20호를 기록한 “1880년 영국의 강우”에서 그는 년평균 강우량을 정확하게 계산하는 일보다 더 흥미있고 실용성 있는 일은 없다고 지적하였다. 초기 우량관측에 대해서 그는 다음과 같이 말하였다. “처음부터 나는 옛날의 우량관측기록은 어떤 결함을 내포하고 있으리라고 생각했으며 실제로도 매우 오래된 관측결과를 믿을 수도 없는 일이다. 17세기와 18세기 초에는 우량을 관측하는 일은 상류사회인이나 할 수 있는 일이라고 여겨 왔다. 따라서 나는 이것들이 현재의 관측결과 보다 믿기 어려운 것이라고 생각한다.”

Symons는 우량을 제량적으로 관측하는 것은 극히 쉬운 일이며 좀 더 나은 관측을 행하려면 그것은 점점 더 어려워지고 재래식 표준관측방법을 지양하고 절대적인 것을 얻는다는 것은 지극히 어려운 일이라는 것을 충분히 인식하고 있

었다. 만일 이러한 방식이 개발되었다 해도 전국의 우량관측망을 이것으로 채택하는 것을 실용적인 것이 못되었을 것이다.

19세기 후반에 들어서 유속계의 사용이 보편화 되었다. 유속계의 기원은 분명치 않으나 이것은 그보다 훨씬 이전에 나타났던 풍속계, 풍차, 수차 및 선박속도 측정기 등을 그 원조(元祖)로 생각할 수 있다. 그리고 몇몇 초기의 수문측정기구가 Henry(1833~1907), Ellis(1829~1883) 및 Herschel 등에 의하여 고안되었다.

미국 기술자로서 괄목할만한 업적을 남긴 사람은 Clinton(1769~1829)과 Francis(1815~1892) 두사람이었다. Clinton은 호수와 수로 및 하천에 대하여 광범위한 조사의 수행을 책임 맡고 있었다. 그는 Eric 운하의 건설운동을 벌였고 그래서 New York주 지사로 당선되었다. 말할 것도 없이 이 수로는 그가 당선된 뒤에 건설되었다. Francis는 예록(銳錄)원어식의 정확한 계수를 결정하기 위하여 실험을 행하였다. 그러나 그는 터빈의 연구에서 보다 중요한 업적을 남겼다.

19세기 수문학의 발전에 기여한 그 밖의 사람들은 Belanger(1789~1874), Belgrand(1810~1878), Boudin(1820~1893), Bresse(1822~1883), Fteley(1837~1903), Miller, Paramelle(1790~1875), Price(1853~1928), Saint-Venant(1797~1886), Stearns(1851~1917) 및 Weisbach(1806~1871) 등이다.

19세기의 수문학이 이룩한 중요한 업적은 수문조사의 수행에 있어 경험적인 실험원리를 확고하게 수립한데 있었고 이 실험원리가 실제 이론과 어떤 상관 관계를 이루고 있는가를 구명하여 낸데 있다. 같은 현상에 대해서 발표되었던 여러가지 공식들이 실질적으로 서로 다른 경우가 종종 있었음이 사실이지만 이것은 어떤 제한된 경험으로부터 일반식을 끌어 내려고 노력하였던 경향때문이었으며 특히 개수로에 대한 여러가지 유량공식이 이러한 사정을 잘 나타내고 있다. 이 기간에 있어서 가장 괄목할만한 수문학 분야의 진전은 하천 유하량의 측정과 지하수 분야에 있었다.