

## 제 11 장

# 19세기 후반 수리학의 진보

초기의 토잉탱크 실험에서 이미 언급한 Benjamin Franklin 이외에도 수리학 분야에서 주목받는 최초의 미국인 실험자는 James Bicheno Francis (1815 - 1892) 이었다. 그의 출생지가 영국의 Southleigh 이었지만 Francis는 어려서 미국에 이민와 Massachusetts 의 Lowell 에 정착하였고 그곳에서 그는 Merrimac 강의 조절된 물을 사용하는 일단의 수공업회



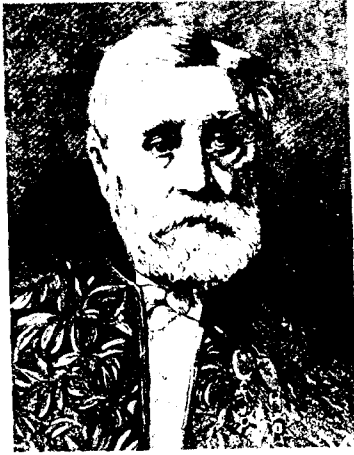
James Bicheno Francis

사의 주임 기술자가 되었다. 이 회사들은 1844년 Uriah A. Boyden 에 의하여 그들중의 한 회사에서 위하여 설계된 터어빈에 대한 자격을 요구하였으며 Francis의 중요한 임무는 그 터빈의 효율을 개선하는 것이었다. 그것은 본래 Fourneyron의 터빈과 유사하게 설계되었으나 원추형 흐름유도장치를 장착하였고 도류날개는 경사졌으며 외향류 터빈날개는 단순한 수증확산관에 연결된다. - 이 장치는 Fourneyron의 확산관 특허보다 십여년 앞선 것이었다. Lowell 수로들 중의 하나에서 실험을 하기 위하여 대규모 설비가 개발되었다. 1855 년 Boston 에서 출판된 Francis 의 'Lowell Hydraulic Experiments' 초판에 설명된 바와 같이 본래의 외향류와 개선된 내향류 터빈날개에 대한 연구가 이루어 졌다.

현재는 후자의 터빈이 Samuel B. Dowd 에 의하여 1838년에 특허가 났고, Francis자신은 그의 장치가 그 자신의 권리로서 특허를 받을 수 있을 만큼 충분히 다른지에 대해서는 자신이 없었다. 그의 믿음으로 볼 때 그 도류날개와 터빈날개의 날은 분리가 자유로운 유입을 하고 터빈날개로 부터 최소 속도로 유출되도록 조심스럽게 설계되었다 (상대운동의 평균속도에 근거해서). 그후 내향류장치가 완성되어가는 동안 어떤 경우라도 결국 그것과 함께 연상되는 것은 Francis 의 이름이었다. 또한 그는 1868년판 그의 책에 기술되어 있는 것처럼 오리피스를 통한 (터어빈을 통한) 흐름이 증대될 수 있는 정도를 결정하기 위한 노력으로서 원추형 확산관을 조사하였다. Francis 는 1880년 ASCE의 회장에 선출되었다.

19세기 후반동안 프랑스 수리학은 Ponts et Chaussees의 일단의 기술자들에 의하여 주도되었다. 그들 중에서 Jean-Claude Barre de Saint-Venant(1797 - 1886)는 개인적으로 가장 놀랍다. Chateau de Fortoiseau(Seine-et-Marne)에서 태어난 그는 Ecole Polytechnique과 Ecole des Ponts et Chaussees에서 교육을 받고 Corps에서 근무하였으며, 역학의 다양한 분야를 연구하고 저술에 전념하기 위하여 1848년 은퇴하였다. 지칠줄 모르는 저술가인 그가

죽었을 때 160여편의 논문을 남겼으며 여러 권의 추가적인 원고들이 사후에 출판되었다. 그의 주된 관심은 탄성론이었으며 그의 주요한 업적이 이 분야에 있다. 그는 또한 수리학분야



Jean-claudé Barre de Saint-Venant

에서 많은 글을 썼으며 특히 파동론, 관수로와 개수로의 저항, 점변류 및 공기의 흐름에 관하여 저술했다. 그러나 다방면에 걸쳐 대단히 많은 저술활동을 한 사람의 경우에서 처럼 유체운동에 관한 그의 많은 출판물들 중 유명한 것은 없으나, 수리학에 대한 그의 순수한 영향은 이것들이 그의 동료와 후진들 모두에게 고무적인 효과를 끼쳤다는 데 있다고 할 수 있다. 그가 발견한 것들이 앞으로 또 다음 장에서 논의 될 것이다. 당장 다음과 같은 작은 공헌들이 그의 이름을 연상시키게 될 것이다. 즉 음속 오피스 분석; 유체에서의 파의 전파 속도와 유체속도를 구별하기 위해 '파속'이라는 용어의 도입; 그리고 등류에 대한 한계경사의 향으로 하천과 급류간의 구분을 한 것 등이다.

Saint-Venant 보다 다소 젊은 Arsene Jules Emile Juvenal Dupuit 는 이탈리아의 Possano

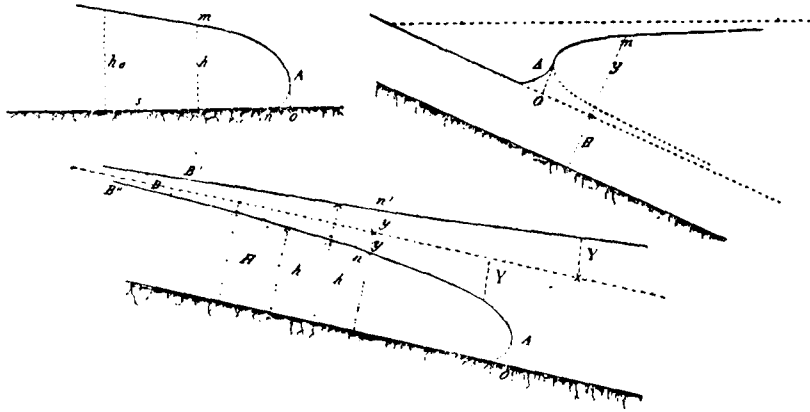


Arsene Jules Emile Juvenal Dupuit

에서 프랑스인 양친 사이에 태어났다. Saint-Venant와 같은 파리의 두 학교에서 교육을 받았고 마찬가지로 Corps des Ponts et Chaussees 에 들어 갔다. Saint-Venant와는 달리 Dupuit는 그의 여생동안 그 Corps에 남아서 활동하였으나 여전히 다양한 기술적인 과제들에 대한 저술에 매우 많은 시간을 바쳤다. 1848 년 그는 파리에서 'Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux courantes'를 출간하였다. 이것은 개수로 흐름에 대한 매우 가치있는 그의 저작이다. 점변류 방정식에 대한 그의 급수적분이 몇개의 근사값(무한폭, 일정저항, 가속도 무시)을 포함했다 하더라도 그는 등류 수심을 기선으로 하여 수평, 완경사, 급경사 수로에 대한 수면형을 올바르게 묘사하였으며, 수로 단면의 확대와 축소 그리고

하상고의 변화 효과를 설명하였다. 또한 그는 홍수파 해석을 위한  $\partial y/\partial t = -\partial q/\partial s$  라는 식을 최초로 소개하였다.

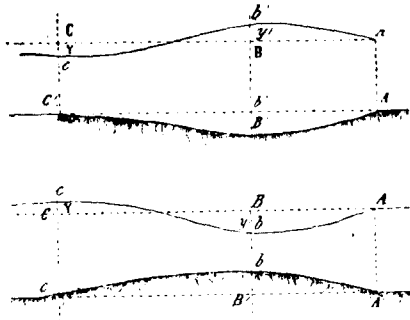
Saint-Venant는 1851 년 Annales des Mines에 발표된 그의 논문 'Formules et tables nouvelles pour la solution des problemes relatifs aux eaux courants' 에서 가속도 효과의 도입과 그 결과를 쉽게 사용하게 하기 위한 표들을 준비함으로써 점변류 방정식의



Dupuit의 개수로 흐름의 수면곡선

Dupuit 급수해를 어느정도 개선하였다. 그러나 마침내 해석적 적분을 한 Jacques Antoine

Charles Bresse (1822-1883)는 그들 두 사람보다도 훨씬 더 젊은 사람이다. 다른 두 사람과 마찬가지로 Corps 에 들어갔으나 Ecole에서 수학교수로 있는 Belanger의 후임자가 되었던 Bresse는 Isere의 Vienne 태생이었다. Saint-Venant와 마찬가지로 거기서 그의 주 관심사는 탄성과 분야였으나 1860년의 논문 'Cours de mecanique appliquee'은 도수의 운동량 특성에 대한 수정공식(그는 Belanger의 1838년 강의노트의 한 것이라 하였음)



불등류 단면에서의 수면곡선

$$\frac{V_1^2 H_1}{g} = \frac{1}{2} h_2 (h_2 + h_1)$$

를 포함하고 있으며, 점변류 방정식에 대한 다음과 같은 적분을 포함하고 있다.

$$l_{Hh} = \frac{H-h}{S} - \frac{h_0}{S} \left[ 1 - \frac{\alpha C^2 S}{g} \right] \left[ B\left(\frac{H}{h_0}\right) - B\left(\frac{h}{h_0}\right) \right] \quad \text{이다.}$$

여기서 h는 등류수심이고

$$B\left(\frac{h}{h_0}\right) = \frac{1}{6} \ln \frac{h^2 + hh_0 + h_0^2}{(h-h_0)^2} - \frac{1}{\sqrt{3}} \cot^{-1} \frac{2h+h_0}{\sqrt{3}h_0}$$

일반적으로 사용할 수 있도록 Bresse는 함수  $B(h/h_0)$ 를 표로 작성하였고 이는 아직도 그분야의 책들에서 재개되고 있다. 흐름 매개변수로서  $V^2/gh$ 라는 무차원량을 그가 최초로 사용했던 것으로 보인다.

Dupuit, Saint-Venant와 Bresse의 개수로에 대한 이러한 공헌과 관련하여 벨기에 Corps des Ponts et Chaussees의 회원이며 Ecole du Genie Civil of Ghent의 교수인 Emmanuel

Joseph Boudin (1820-1893)에 의한 오늘날의 전문용어도입이 언급되어야 한다. 1863년에 Boudin 은 'De l'axe ydraulique des cours d'eau contenus dans un lit prismatique et des



Jacques Antoine Charles Bresse

dispositifs realisant, en pratique, ses formes diverses' 라는 책을 Ghent에서 출판하였다. 거기서 그는 등류수심이 한계수심보다 큰가 작은가에 따라 수면형을 A 와 B 군으로 분류하고 수심이 등류수심과 한계수심보다 큰가, 그들 사이에 있는지, 혹은 그들보다 작은가 여부에 따라 1, 2, 3, 형으로 분류하였다. 개수로 흐름이란 주제를 마치기 전에 또한 언급되어야 할 것이 있다. 1871년 Saint-Venant 가 프랑스 학술원 (Academie des Scienes) 에 'Theorie du mouvement non-permanent des eaux' 란 논문을 제출하였다. 그 논문은 부정류흐름의 일반적인 미분방정식을 최초로 포함하고 있으며 이는 수두손실이

수로경사와 평형을 이루는 특별한 경우에 대하여 그가 적분한 것이었다.



Henry Philibert Gaspard Darcy

그 당시 프랑스 Corps의 네번째로 주목할 만한 회원은 국민 청원에 의해 그의 출생지인 도시에 배치된 Dijon 태생의 Henry Philibert Gaspard Darcy(1803-1858) 이다. 거기서 그의 주 임무는 상수도 시스템의 설계와 운영이었다. 그것은 훌륭하게 구실을 다하였을 뿐만 아니라 (후에 Brussel시는 그와 유사한 과제의 고문으로 그를 고용하였음) 그가 관수로와 투수성 토양에서 물의 흐름에 관하여 수행한 일련의 연구들에 기초가 되었다. 관수로 실험의 결과는 1857년 'Recherches experimentals relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux' 라는 제목으로 발표되었다. 이것은 22개의 정제된 철, 주석, 주철, 아스팔트로 포장된 철 그리고 유리관을 포함하였으며, 다양한 상태

의 질과 직경 1/2 - 18 in 범위, 여러 부식 정도를 달리 변하고 있다. 수리학에 대한 Darcy의 위대한 공헌은 흐름의 저항이 주위 물질의 형태와 조건에 따라 달라진다는 사실에 대한 결정적인 증명에 있었다. 속도의 첫째와 두번째 멱승을 포함하는 관계인 Prony 형을 참고로 하여 그의 실험으로부터 그는 다음 결론을 내렸다 [1] :

퇴적물을 포함한 관을 다루거나 큰 유속이 흐름에 강하게 작용하거나 하면, 즉 표면의 거치른 상태로 생길 수 밖에 없는 저항부분이 커진다면 - 속도의 첫째 항은 사라지고  $V^2$ 의 계수가 커진다: 그러므로 후자

는 적어도 부분적으로는 조도와 관계가 있다.

그러나 마침내 그는 다음 말에서 아는 바와 같이 경계층의 역할을 정성적으로 깨달았다.

만일에 유약을 바른 역청 등으로 입힌 매우 매끄러운 납관을 사용 한다면  $V^2$ 의 계수는 광택정도가 증가함에 따라 연속적으로 감소한다.

그러나 그림에도 불구하고 그 감소는 포함된 광택의 정도에 비례하지는 않는다. 눈으로는 식별할 수 없는 조도의 증가가 유체분자들에 저항한다고 말할 수는 없는 것 같다; 즉 아직도 충분한 설명이 되지 않는 것 같다. 결과적으로  $V^2$ 의 항은 거칠기에 의하여 생긴 저항과 관련하여 나타날 뿐만 아니라, 거의 경계 가까이 에 있는 유체층에 의해서도 생성된다.”

그러므로 Darcy는 매끄러운 관에 대해 다음 형태의 저항공식을 제안하였다.

$$DS = \left(a + \frac{b}{D^2}\right)V + \left(b + \frac{c}{D}\right)V^2$$

반면에 거치른 관에 대해서는 두째 항만을 추천하였다(약간 큰 계수를 사용).

유속분포의 정체관 (stagnation-tube) 측정에 근거하여 (그리고 의사이론해석) 그는 또한 다음 형의 유속분포 관계를 고안하였다.

$$V_{\max} - V = Cr^{\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{S}}{D}$$

이 연구결과 때문에 Darcy의 이름이 Weisbach가 최초로 공식화 한 오늘날의 저항공식을 구상하는데 있어서 Weisbach의 이름과 함께 흔히 연상되고 있다. 그러나 Darcy 자신은 결코 그의 분석에서 무차원 계수를 도입하지 않았으며, Weisbach와는 다르게 Darcy의 공식이 Prony의 공식과 같이 된 것은 당연하다. 반면에 Darcy의 차원계수는 - 비록 그가 절대조도의 구분을 시도하지 않았다 하더라도 - 절대직경에 의하여 결정되는 상대조도가 분명히 구체화 되었다고 하는 정도로 앞선 모든 것을 능가하는 것이었다.

Darcy의 침투연구의 적절한 결과들은 - 침투에 따른 수두손실은 널리 생각되어 왔던 유량의 제곱근보다는 오히려 유량에 비례한다. - 1856년 Paris에서 발표한 그의 논문 “Les fontaines puligues de la ville de Dijon”에 포함되어 있다. 1865년에 선보인 “Taite theorique et pratique de la conduite et de la distribution des esyx”라는 제하의 1848년판 책의 증보판에서 Dupuit는 기준선  $Z$ 를 통하여 우물로 들어오는 투수성 물질의 축대칭 흐름 결과인 수두변화를 해석적으로 다음과 같이 나타내었다.

$$h - h_0 = \frac{Q}{2\pi kz} \ln \frac{r}{r_0}$$

또한 Dupuit는 다시 정격유속이 방사상 방향으로만 변화한다는 가정을 함으로써 자유수면을 갖는 침윤에 그 법칙을 적용하였다.

$$h^2 - h_0^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{r}{r_0}$$

윗 식의 관계가 우물에 가까와 짐에 따라 지속적으로 정확도가 떨어지게 된다는 것이 지금 알려져 있다. 그러나 아직도 그것은 보다 개선된 해석을 위한 시발점으로서 사용되고 있다.

Dupuit는 같은 책에서 하천이 퇴적물질을 부유형태로 운반하는 능력에 대한 최초의 언급을 기록으로 남겼다. 가장 가는 입자들이 가장 오랜동안 부유상태로 있는 경향이 있으며 그 입자들의 수와 크기는 부유가 일어난 하상에 가까와 짐에 따라 증가한다는 지적을 한 후에 그는 다음과 같이 말했다. [2] :

유수는 물의 밀도보다 더 큰 밀도의 고체입자들을 부유상태로 유지할 수 있다.

부유능력은 수류의 상대속도에 의존하고 있으며 유속이 커짐에 따라 커진다. 일반적으로 저층들이 더 풍부하고 더 많은 양의 고체입자를 운반할 수 있다고 하는 면에서 볼 때 그것은  $dv/dz$ 의 크기에 관계된다.

각 층의 부유능력은 한정되어 있다. 말하자면 1평방미터는 어떤 주어진 용적의 고체입자들의 수만을 운반할 수 있다. 따라서 각 층은 서로 다른 포화도를 갖는다.

Dupuit가 유사입자들이 주로 부유상태로 운반된다는 것을 가시화하였음에도 불구하고 Corps에서 그의 후계자들은 소류사만의 운동을 다루었다. Mederic Clement Lechallas (1820-1904)는 1871년 Annales에 "Note sur les rivieres a fond de sable"라는 논문을 발표하였는데 그 논문은 다른 형태의 운동에 대한 뛰어난 논의를 하고 있다. 이는 Dupuit와는 달리 속도경사를 피하고 대신에 더 쉽게 측정할 수 있는 수심과 경사를 고려한 1879년의 Paul Francois Dominique du Boys ( 1847-1924 )의 논문 "Le Rhone etles rivieres a lit affouillable"으로 이어지고 있다. 그는 흐름에 의해 작용되는 시동력은 하상의 저항, 즉  $F = \gamma_{ys}$  와 같다는 것을 최초로 밝혔다. 그때 연직방향으로 일정한 속도경사를 갖는 일련의 층들에서 발생하는 하상운동을 다룸으로써 그는 다음 식에 도달하였다.

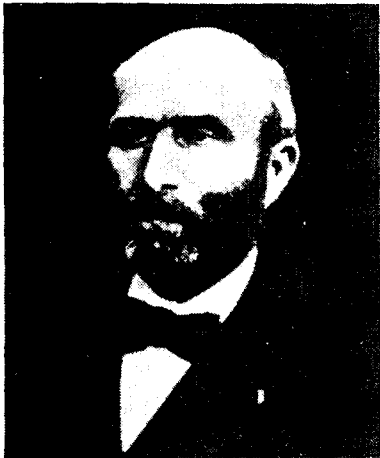
$$q_s = xF(F - F_0)$$

여기서  $q_s$ 는 단위폭당 유사운송량을 나타내고,  $x$ 는 운송계수,  $F_0$ 는 초기운동 시점에서 하상 전단강도이다. 그 가정들이 비현실적이었지만 이런 형태의 소류사 공식은 그 이래로 많은 실험적 연구의 기초로서 사용되어 왔다.

Darcy가 Dijon에서 그의 연구를 통하여 받았던 수 많은 경의에도 불구하고 부당하게 그는 1848년 혁명시에 그 도시를 떠나도록 강요받았고, 그후 Bourges와 Paris에서 도로와 포장에 대한 책임자의 자리에 임명되었다. 1855년 그는 신경과민 증세의 악화로 인하여 모든

임무로 부터 벗어나 수리실험을 계속할 수 있었다. 그 때의 출판물로 조성된 자금으로 관수로 흐름 연구에서 공헌한 것을 접목시키려는 노력으로서 그는 Dijon에서 Bourgogne수로의 600m지류에서 일련의 개수로 실험을 시작하였다. 그는 그의 실험계획을 완수하기 위하여 열심히 일하였으나 급격히 떨어지는 체력 때문에 그는 겨우 그가 죽은 후 그 실험을 계속할 수 있는 후계자를 훈련할 수 있었다.

이 후계자는 Corps회원의 정규교육을 받은 후 1854년 Dijon에 정착한 Nancy 태생의 Henri Emile Bazin (1829-1917)이었다. 거기서 그는 Darcy를 만났고 그의 실험요원으로 임명받았다. 완벽한 실험자인 Bazin은 개수로 저항에 대한 Darcy의 원래 실험계획을 완성했을 뿐만 아니라, 파의 전파와 웨어상의 흐름을 포함하는 실험까지 확장하였다. 1875년에 그는 Bourgogne수로계통 관할권을 갖는 최고 기술자의 자리에 승진되었고, 1886년에는 Paris에 있는 Corps의 일반 감독자의 지위에 올랐다. 그러나 죽기전 금세기에 이르기까지 그는 35개의 제목을 갖는 과학적 저술들을 (그가 Darcy와 관계하기 이전에 시작되었던) 계속하였다. 이들 중 보증이 될 만큼 두드러진 것을 언급한다면, Darcy와 그 자신의 이름으로 Academie des sciences에 의해 1865년 출판된 "Recherches hydrauliques - 1 Partie, recherches experimentals sur l'écoulement de l'eau dans les canaux decouverts; 2 Partie, recherches experimentales relatives aux remous et a la propagation des ondes" 와 1888년부터 1898년까지 Annales des Ponts et Chaussees에 게재된 웨어흐름에 대한 그의 논문을 1898년에 편집한 "Experiences nouvelles sur l'écoulement en deversoir"이다. 1900년 Bazin은 활동적인 일에서 은퇴하였기 때문에 더 이상 실험을 위한 자금을 얻을 수 없었다. 1913년에 이르러서야 Academie는 뒤늦게 그를 회원으로 선출하였다.



Henri Emile Bazin

개수로 흐름에 대한 Bazin의 1865년 논문중에 Part 1 은 가치있는 새로운 정보를 포함하고 있으며, 연설에 있어서 그의 유명한 소심성과는 달리 명쾌한 방식으로 완벽하게 설명되어 있다. 그 실험들은 시멘트, 목재, 벽돌, 자갈, 바위등의 재료로 된 사각형, 사다리꼴, 반원형 단면들을 갖는 수로에서 수행되었다. 등류 흐름 조건에 대하여, Darcy의 관수로 실험에서처럼 흐름저항은 경계의 형태 뿐만 아니라 단면의 상대적 크기에 좌우된다고 하는 것이 알려졌다. 그러나 사실 Prony 공식은

$$RS = \left(a + \frac{b}{V}\right) V^2 \text{ 인 반면에}$$

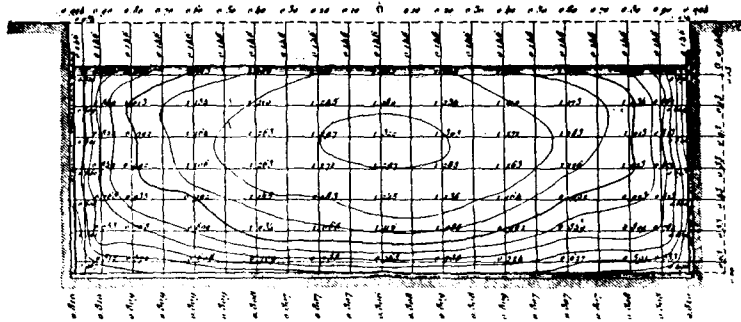
Darcy-Bazin 자료에 따른 공식이 다음 형태를 갖게된다는 것을 나타낸다.

$$RS = \left(a + \frac{b}{R}\right) V^2$$

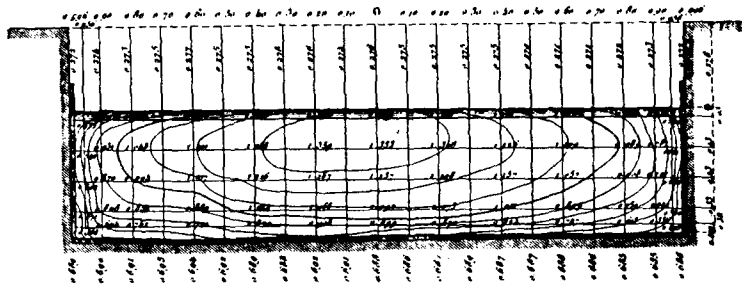
이는 경계의 재료에 따른 두 계수의 변동으로 Prony가 채택한 공식의 1/2 에서 2배 범위의 결과를 준다. 후자의 공식은 경사에 따른 저항의 변동을 포함하기 때문에 Bazin이 이 문제에 대하여 한 말을 인용하는 것이 적절하다. [3] :

### HISTORY OF HYDRAULICS

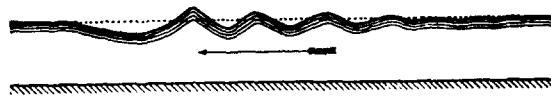
Expérience N° 2.



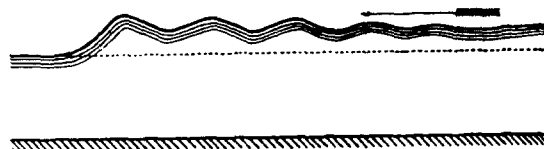
Expérience N° 4.



수심변화에 따른 속도분포의 변화



표면의 파동에 따른 파의 진행

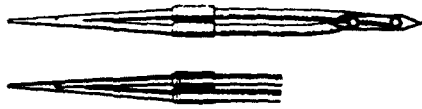


서지파동때의 수면



사실은 두 계수들이 경사와 전혀 무관한 것은 아니지만 그들은 [Prony]의 이항공식의 한계 보다 훨씬 더 좁은 범위내에서 변한다.

$a + b/R$ 공식의 실용적인 우수성은 두 계수들이 수로경사를 수정할 때 서로 역비례적으로 변동하기 때문에 결과적으로  $S$ 가 증가함에 따라  $a$ 는 증가하고,  $b$ 는 반대로 감소한다는 사실에 따른다. 그러므로 비록 최초의 것과 다르다 하더라도 여러가지 경사에 대하여 얻어진 그 공식은 보통 적용한계 이내에 있는 이상적인 값을 주며, 그러므로 그들은 평균계수를 갖는 단일공식으로 불편없이 대체될 수 있는 일종의 보정이 수립되었다. 식  $a + b/V$ 에서는 두 계수들이 수로경사에 따라 급격히 증가하는 것과는 다르다.

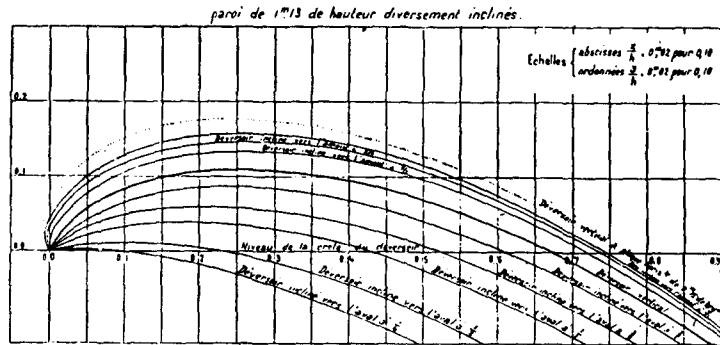


Darcy가 변형한 Pitot tube

또한 그는 Darcy가 끝 부분과 측면개구를 결합한 피토크관을 이용하여 도장이 다른 다양한 횡단면의 속도분포를 관측하였다. 이로부터 Bazin은 최대속도점의 깊이는 횡단면의 상대폭에 따라 변하는데 수심과 폭의 비가 5를 넘어설 때 0에 접근하게 된다고 하였다. 그는 이 때의 연직방향 유속분포

가 다음 형태를 갖는다는 것을 발견하였다.

$$\frac{(V_{\max} - V)}{\sqrt{h_0 S}} = C \left( \frac{y}{h_0} \right)^2$$



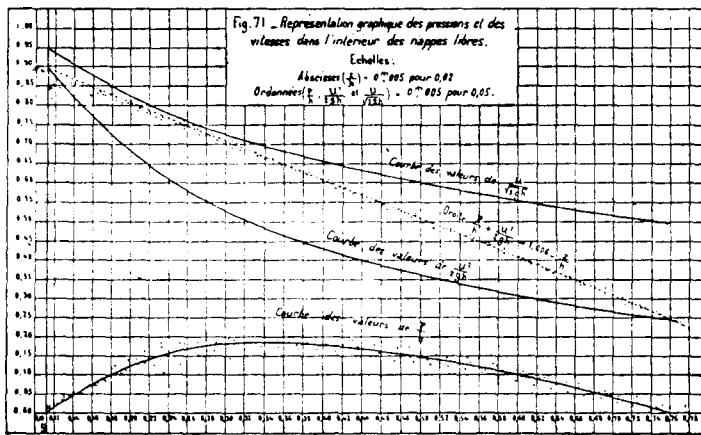
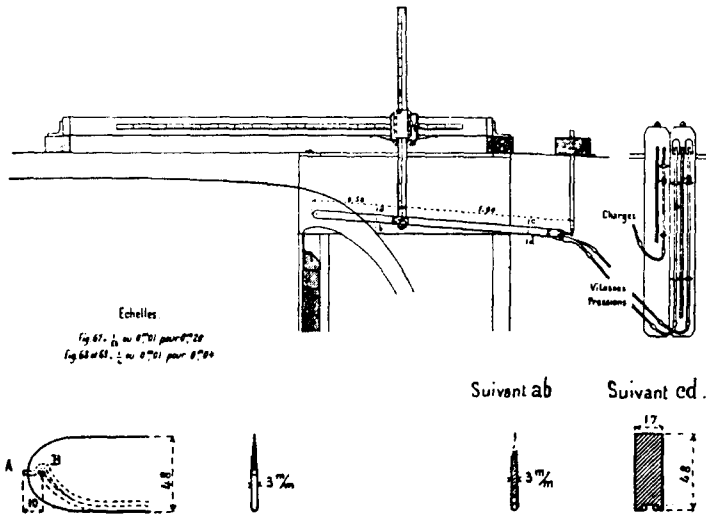
웨이경사에따른 수면의 변화

그 논문의 Part 2에 설명된 개수로에서의 파에 대한 연구들은 Russell에 의하여 앞서 수행된 것을 대충적으로 대부분 재현하였으나 그들은 또한 흐름방향 및 흐름의 반대방향 파와 진동파의 전파를 포함하였다. 파속에 대한 Russell의 공식은 정 뿐만아니라 부의 다양한 상대진폭에 대하여 입증되었다. 진동에 관한 한 보기에 Bazin은 Bresse의 도수에 대한 운동량

해석을 잘 몰랐고, 진동 속도에 대한 실험공식의 유도에 실패한 것 같았다.

연직이고 경사진 칼날웨어의 유량에 대한 그의 후속적인 연구는 그가 앞서 수행했던 연구보다 훨씬 뛰어난 실험의 수완을 보여주었다. 왜냐하면 그의 자료가 아직까지도 여수로 정부의 설계에 사용되고 있을 만큼 정확도를 갖는 수맥형상의 좌표를 그가 결정하였을 뿐만아니라 수맥의 유속과 압력의 분포를 관찰하였기 때문이다. 웨어유량을 표현하는데 있어서 그는 저수두시 변동을 위한 그 자신의 차원항을 더한, Weisbach에 의하여 제안된 무차원 공식을 채택하였다.

$$\zeta = (0.405 + 0.003/h) [1 + 0.55(h/h+w)^2] \sqrt{2g} h^{3/2}$$



수직웨어에서의 압력과 속도분포를 측정하기위한 Bazin의 장치

또한 Bazin은 다양한 형태의 광정웨어와 둥근마루웨어(round-crested weirs)의 흐름과 수위 가 다른 수중웨어에 대한 수많은 측정을 실시하였다.

Darcy와 Bazin의 업적에 조금 앞서, 개수로 저항에 관심있는 유럽 사람들은 미육군 대위 A. A. Humphreys와 중위 H. L. Abbot가 지형기사 사무소 (Bureau of Topographical Engineers)에 1861년 제출한 방대한 “미시시피강의 물리학과 수리학에 관한 보고서”에 의하여 몹시 자극 받았으며, 그 보고서는 미시시피강 홍수극복에 포함된 전례없는 비용으로 시도된 조사를 의미하는 것이었다. 결코 최초의 하천측량이 아닌 이것은 그때까지 시도된 것 중 단연 최고로 광범위한 것이었으며 그 보고서는 오늘날에서조차도 유익한 독서물로 남아 있다. 주로 역사적으로 흥미있는 부분은 개수로 저항에 대하여 알려진 모든 유럽문헌의 재고찰과, 현존하는 공식들을 그들 자신의 측정에 적용하기 위한 저자들의 노력을 기술하였다는 것이다. 일관성 있는 일치도를 얻는데 실패하였기 때문에, 그들은 새로운 공식을 유도하였으며 미시시피강 자료뿐만아니라 입수가 가능한 모든 자료들 - Du Buat가 그의 작은 실험실에서 얻은 자료들까지 포함 - 과도 일치시키기 위해 노력하였다. 그 공식자체는 조도의 향이 없음에도 불구하고 성가신 일이었으며, 그 공식의 구조는 그 후의 조사자들이 그들 자신의 공식을 보다 명확하게 하기 위해 찾았던 사실보다 흥미가 덜하였다.



Emile Oscar Ganguillet



Wilhelm Rudolf Kutter

이들중의 가장 잘 알려진 것은 두명의 Swiss 기술자로 Bern에서 공공시설국 주임기사로 있는 Emile Osca Ganguillet (1818-1894)와 그의 참모중의 한 사람인 Wilhelm Rudolf Kutter (1818-1888)의 공헌에 의한 것이었다. Kutter는 개수로 저항의 국부적인 문제에 이미 관심을 갖고 있었으며, 가능한 한 광범위한 조건하에서 그들 자신의 공식을 실험하기 위하여 Humphreys와 Abbot의 갑작스런 초청에 동의 하였고, 그것을 스위스 산지하천에서 측정

한 것과 비교하였다. 그가 도달한 - 그래서 그의 상급자에게 추천한 - 결론은 Humphrey와 Abbot 공식은 상대적으로 완만한 경사에만 사용되어야 하며, Bazin 공식처럼 조도의 영향이 설명되어야 한다는 것이었다. 그러나 1896년 그들의 논문 “Versuch zur Aufstellung einer neuen allgemeinen Formel für die Gleichformige Bewegung des Wasser in Canalem und Flüssen”에서 언급한 것처럼 [4]:

두 공식은 모두 일반적으로 적용할 수 없다. M. Bazin의 공식은 Humphrey와 Abbot의 공식이 급경사 수로에 적용할 수 없는 것처럼 Mississippi강에는 정말로 적용할 수 없다: 그러나 그것은 (Bazin의 공식) 단지 경사의 영향을 도입함으로써 간단하게 일반적으로 적용될 수 있는 공식인 것에 반하여 미국인들의 공식은 이 정도로 일반화 될 수 없다.

Ganguillet와 Kutter의 일반화 된 공식은 다음과 같다.

$$C = \frac{a + \frac{b}{n} + \frac{m}{S}}{1 + (a + \frac{m}{S}) \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

여기서 C는 Chezy계수, a, b, m은 상수, n은 조도에 따라 변하는 매개변수이다. 수백개의 실험에 근거하여 (Humphreys와 Abbot는 16개, Bazin은 97개, 그리고 그들 자신이 산지 하천에서 실험한 것 다수를 포함) 그들은 상수를 결정하였고, 다음과 같이 6등급으로 n의 평균값을 제안하였다: 평평하고 매끄러운 시멘트 평판; 보통 평판; 인공석 벽돌; 자연석 벽돌; 흙으로 된 수로; 쇠석이나 수생식물로 된 하천. 이 논문의 사본에 대한 수요가 너무 커서 논문이 실린 논문집이 곧 바닥났다. 그러나 1877년 그 논문은 증보하여 책으로 재출판되었으며, 이것은 여러 나라의 언어로 번역되었다.

1897년에 이르러 Ganguillet-Kutter 공식의 호평으로 자극받아 Bazin은 그의 예전에 발표된 공식을 다음 공식으로 대체하였다.

$$C = \frac{A}{1 + \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

여기서 r은 n과 같은 조도계수이다. - 그러나 똑같은 6개의 수로등급에 대하여 단지 3배의 범위라기보다 오히려 30배 이상의 범위로 변화한다. 다시 Bazin이 경사를 생략한 것은 주목할 만하다. Gaspard Gauckler (1826-1905)에 의하여 1868년 매우 다른 시도가 이루어졌다. Ponts et Chaussées의 기술자인 그는 여러 형태의 수로에서 흐름을 설명하는 하나의 단순한 공식을 발견하려 노력하였으며 다른 경사범위에서 사용하기 위한 두 개의 식을 다음과 같이 제안하였다.:

$$\begin{aligned} V &= \lambda_1 R^{4/3} S & S > 0.0007 \\ V &= \lambda_2 R^{2/3} S^{1/2} & S < 0.0007 \end{aligned}$$

이중 두번째와 똑 같은 식이 20년 후 에이레의 기술자인 Robert Manning (1816-1897) 에 의하여 고안되어 조사되었다. Manning은 그의 부친이 참전했던 Waterloo전쟁이 있던 해 Normandy에서 태어났다. 공무국의 주임 기술자로서 그는 여러가지 배수, 내륙주운, 항구 등의 계획에 대한 책임을 지고 있었으며, 그는 또한 에이레의 토목공학연구소 소장으로서 어느 기간동안 봉직하였다. 그의 저작물로부터 판단해 볼 때 그의 주 관심사가 수문학이었다 하더라도 1889년에 그는 이전의 저항공식들에 내재해 있다고 믿었던 여러가지 문제점들을 개선한 논문 “개수로와 관수로에서 물의 흐름에 관하여”를 연구소에 제출하였다. 겉보기에는 Gauckler가 제안한 것에 대해 아는 바가 없었다 하더라도, 그는 다음 형태의 관계식이



Robert Manning

만일 오늘날의 공식들이 거의 예외없는 경험공식이고, 그래서 균일하지 않거나 차원에서조차도 맞지 않은 다면, 그 때는 이와 같은 식은 모두 그들 스스로가 관찰한 것에 의존할 수밖에 없고, 그래서 엄격히 말하자면 이외의 단일 경우에 적용될 수 없다.

보다 일반적으로 사용되는 공식보다 측정된 자료들과 잘 일치한다는 것을 보여주었다.

$$V = K R^{2/3} S^{1/2}$$

그러나 그는 사용하기에 불편한 분수승을 고려하였을 뿐만아니라, 그는 다음과 같은 사실을 분명히 인식하였다. [5]

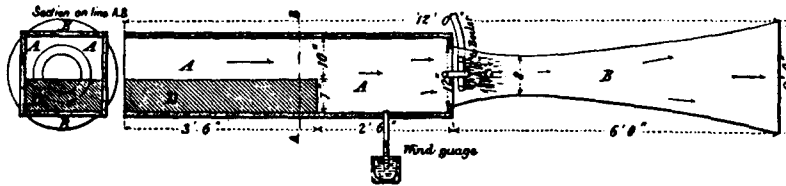
그러므로 지금은 Manning이 그의 이름과 관련있는 형태의 공식을 버리고 대신에 다음과 같이 차원적으로 볼 때 균질인 관계식을 제안하고 있다.

$$V = C\sqrt{gS} \left[ R^{\frac{1}{2}} + \frac{0.22}{m^{\frac{1}{2}}} (R - 0.15M) \right]$$

여기서 C는 Chezy 계수가 아니라 표면의 성질에 따라 변하는 계수이며, m은 (그는 이를 물리적 이유 뿐만 아니라, 차원적인 이유로 도입한 것임) 대기압과 평형을 이루는 수은주의 높이이다. 그 점에서 Manning은 어떠한 공식에서도 Kutter의 n의 사용을 제안하지 않았기 때문에 Chezy가 본래 제안했던 것만큼 현존 문제의 계수는 고려중인 수로형태에 대하여 알려진 자료부터 얻었다. 우리가 Manning 공식이라 부르는 것이 전적으로 Manning 자신에 의하여 고안되거나 추천되지도 않았으며 그가 실제적으로 추천한 것은 그 후에는 주목받지 못하였다.

19세기의 마지막 3년은 오늘날 실험실 실습에서 선도적 역할을 꾸준히 하고 있는 소규모

실험에 대한 3가지 실험적 기법의 발달을 보였다. 하나는 풍동실험이, 다른 하나는 이동상 하천모형이며, 세번째로는 예인수조이다. 이 세가지는 서로 관계가 없지만 적어도 첫째와 세 번째 것은 일지기 Mariotte의 저항측정으로부터 시작되어 오랜동안 지속된 일련의 관찰을 배경으로 하였다. 흐르는 물에서의 실험으로부터 예인수조와 회전팔을 모두 갖는 실험에 이르기까지의 경향이 이미 설명되었으며, 언급되어야 할 것은 이러한 현상을 지배하는 기본적인 상사법칙을 공식화하기 위한 시도가 이루어졌다는 것이다. 그러나 풍차와 수차에 대한 Smeaton의 실험과 같이 개별적인 예를 제외하면, 이 상사법칙들의 실제적인 적용때문에 실험기법의 필요한 개선이 요구되었다.



Phillips의 풍동 상세도

주목할 것은 양력날개와 그들의 개선에 관심이 집중되기 전까지는 풍동이 실험기구에 포함되지 않았다는 것이다. 독일의 기술자인 Otto Lilienthal (1848-1896)은 1866년에 회전팔에 있는 경사진 판의 양력을 최초로 측정하였다. 그때 그는 양력을 증가시키기 위한 노력으로써 평판에 공기실과 몸체를 달았으며, 1874년에는 결과적으로 자연풍과 같은 형태를 실험하였다. 이런 모든 실험들은 "Der Vdgelflug als Grundlag der Flieqerkunst"에 설명되어 있으며, 이는 Lilienthal 이 그와 그의 형제 Gustav가 몇 안되는 세계 최초의 글라이더를 만들기 바로 2년전인 1889년 Berlin에서 출판되었다. 공기실을 갖춘 날개에 대한 생각은 1884년 영국인 Horatio Frederick Phillips에 의하여 독자적으로 착상된(특히 획득) 것이었으며, 그 후 그는 그들의 양력과 저항력을 측정하기 위하여 작은 풍동을 고안하여 만들었다. 그의 실험결과들은 영국 논문집 "Engineering"에 1885년 무명으로 게재되었으며, 그 논문 "공기의 흐름이 있는 실험"은 오늘날 Venturi형태의 수송관에서 검사면 하류부에 위치한 증기 주입 장치에 의해 운전되는 최초의 풍동을 보여주고 있다. 흥미롭게도 정량적인 물리적 항으로 양력현상을 최초로 설명하고자 한 사람은 Lilienthal과 Phillips도 아닌 Phillips와 같은 나라 사람인 Frederick William Lanchester (1868-1946) 이었다. 모형글라이더로 실시한 광범한 실험결과들로부터 Lanchester는 더 최근의 순환이론의 주 형태를 드디어 개발하였다. 그러나 그는 실제 동수력학과 비교하여 이론적인 동수력학을 비난하는 경향이 있었으며, 그래서 그는 그 자신의 분석을 유체운동의 고전적인 법칙들과 조화시킬 수가 없었다.

이동상 하천 모형에 대해 가장 먼저 알려진 실험은 Ponts et Chaussees의 Louis Jerome Fargue (1827-1910) 가 1875년 Bordeaux에 있는 Garonne강의 개수를 위하여 수행한 것이었다. 수평규모는 1:100, 하천제방은 고정되어 있고, 모래층을 하상위에 깔았다. 그러나 수심과 시간축척을 임의로 선택하였기 때문에 Fargue에게 명예가 될 만한 것은 그 기법이 아니라 그 생각이다. 이 축척들은 다음 장에서 더 언급할 Osberne Reynolds (1842-1912)가 1885년 Liverpool 근처 Mersey강의 조석모형을 실험하는 동안에 처음으로 적절히 상관지어졌다. 근사적으로 세배의 왜곡도가 사용되었고, 조류의 효과를 나타내기 위하여 하상에 모래를 깔았으며, 부자의 조정으로 조석을 발생시켰다. [6]

손으로 하는 모형작업은 모형에서 물의 운동이 Mersey에서 실제 조석운동을 모의하는 하나의 작업기간이 있다는 것을 동시에 보여주었다. 여기서 그 기간은 약 40초로 구하여졌으며 이는 속도축척이 파고축척의 제곱근에 따라 변화하기 때문에 파동론으로부터 예견할 수 있는 결과이다. 그러므로 수로에서의 속도에 상응하는 모형에서의 속도가 연직축척의 제곱근을 따르는 ... 그리고 시간의 비는 수평축척의 비를 속도 비로 나눈 것이다.

Mersey에 대한 Reynolds의 실험들은 런던의 University College에서 토목공학 교수로 있으면서 그후 Seine 하구의 개수에 관심을 기울였던 Levison Francis Vernon-Harcourt (1839-1907)에 의해 계속되었다; 그후 모형 실험과정에서 그는 Reynolds에 의하여 시작된 그 과정을 정확히 설명하였으며 아직도 하천조사에서 채택되고 있다. [7]

만일 원래의 현존 조건들을 전형적으로 재현할 수 있는 모형으로 가지고 실험하는데 성공한다면, 그래서 더욱 이 모형에서 얻은 규정된 작업을 대치함으로써 실제로 훈련받은 작업자들에 의하여 수행되어 똑같은 변화가 재현될 수 있다면, 그때 나는 제안된 그 계획의 가능한 결과를, 말하자면 성공할 확신을 가지고 관측할 가장 중요한 세 번째 단계를 취할 수 있다고 확신한다.

모형배 실험을 위한 예인수조 기법은 두 영국 사람인 William Froude (1810-1079) 와 그의 아들인 Robert Edmund Froude (1846-1924)의 공헌에 힘입은 바 크다. 부친은 Devonshire Dartingham에서 태어나 Oxford에서 수학을 전공하고 조선소에 고용된 청부업자 아래에서 토목공학 훈련을 받았으며, 36세의 나이에 활동적인 훈련에서 은퇴하였다. 그러나 그 자신이 배에 큰 관심을 가지고 있었기 때문에 (특히 요트 조종과 프로펠러 설계에 대해 관심을 가짐) 그의 앞서 고용주의 요구에 따라 그는 'Great Eastern'의 진수 전후와 관련하여 저항과 rolling 실험을 하였다. 그는 죽을 때까지 이 조사에 계속하여 매우 열중하였다. 60대에 그는 축척모형으로 배의 저항에 대한 연구를 개인적으로 시작하였고, 해군 조선소의 직원들과 John Scott Russell의 강한 반대에도 불구하고 영국해군의 자금지원을 받아

250ft의 예인수조를 Torquay에 있는 그의 집 근처에 건설하였다. 이것은 그가 죽기 8년전인 1872년에 운용되었지만, 그러나 그 일은 후에 Haslar에 있는 현존 해군본부 탱크를 건설한 그의 아들에 의하여 훌륭하게 계속되었다.

Reech와 마찬가지로 Froude의 처음 실험은 작은 축척으로 잘 수행된 실험은 원형인 배의 운행을 정확하게 나타내는 결과를 줄 것이라는 것이었다. 1868년 해군본부에 대한 그의 자금요청에서 그는 이 관점에 반대하는 그 당시 주장을 뒤엎을 수 있는 것을 찾았다. [8]

물이 원형 배보다 더 큰 파를 비례하여 일으키도록 끌어 당겨질 때, 그 모형들은 ... 할 것처럼 보이는 것이 관측되었다. 이 점에 대한 대답으로써 나는 원형 배가 상응하는 속도에 의해 유도된 것처럼 매우 가공할 만하게 보이는 파를 만들어 낼 것이라고 가정하는 중요한 이유가 있다는 것을 감히 주장한다.

상응하는 속도를 정의하기 위하여 Froude는 Reech의 상사율 법칙을 이용하였다. (그러나 Reech의 이름을 언급하지 않고):

여러가지 연속적인 속도에서 어떤 모형의 저항축척을 나타내는 도표는 그와 상사인 배의 저항을, 단지 여러가지 연속적인 속도에서 그 규모에  $n$ 배의 저항을 똑같이 나타낼 것이지만, 만약 그 배의 경우에 그 도표를 적용한다면 우리는 모든 속도를  $\sqrt{n}$ 배로 설명하고 상응하는 저항을 그 도표에서와 마찬가지로  $n^3$ 배로 설명한다.



Torquay 탱크의 종방향 전경

둘째로 반대되는 주장은 물의 강도(점성)효과에 관한 것이었다. Reech가 Froude 이전에 했

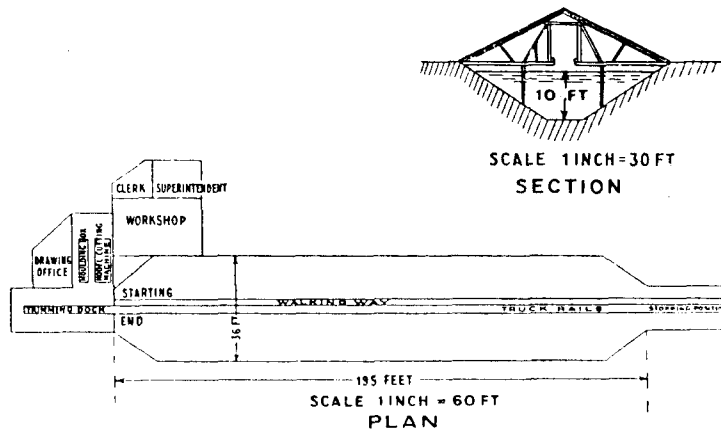


던 것처럼 - 적어도 축척이 충분히 크다면 - Froude는 이것을 무시할 수 있다고 가정하였다:

“이 물체의 중량은 취급하는 모형의 제원이 그것이 물에 있을 때 그 성질의 작용을 실제적으로 느끼는 제한된 제원을 증가하는지 여부에 좌우된다 ...



William Froude

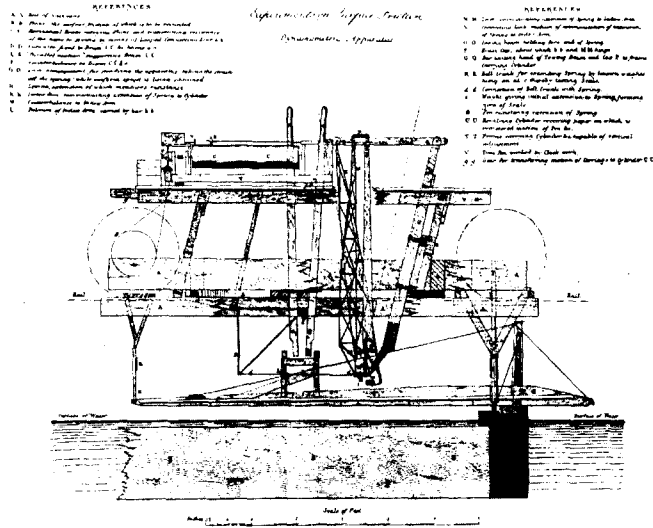


Torquay 탱크의 내부도

... 반면에 3ft와 6ft의 상사모형 실험과를 비교하여 볼 때, 전자는 이상의 원인에 기여 가능한 비레저항을 약간 증가하는 것을 보였다는 것이 나의 실험에서 발견되었다. 6ft와 12ft 모형사이에서 이같은 차이는 관측될 수 없었다.”

그럼에도 불구하고 Froude는 점성의 계속되는 효과에 대한 의문을 가졌음에 틀림없다는

것이, Tdrpuay tank에서 수행한 최초의 실험이 실제로 수중목판의 표면마찰에 대한 일련의 광범한 것이었다는 사실에 의해 시사되고있다. 여기서 길이는 10in에서 50ft까지 변하고 옥양목과 모래입자로 입혀 그것이 완전히 사라질 때까지의 범위에 대해 실험하였다. 1872년 영국협회에 제출한 이 실험에 관한 그의 보고서에서 그들의 목적은 (a)속도, (b)길이, (c)그 표면의 처리에 따른 저항변동을 결정하기 위한 것이라고 그는 말했다. 그가 앞서 가졌던 믿음과는 반대로 매끄러운 표면의 저항은 단지 속도의 1.85승에 따라 변하는 것으로 밝혀졌으며,



Froude가 사용했던 풍동의 그림

매우 거치른 표면에 대해서만 2.0승에 가까와 졌다. 길이의 효과에 관한 한 Froude는 최근에 경계층 항에서 평균저항의 비례감쇠를 설명하였다. [9]

나에게는 늘 ... 물로부터 저항을 경험하게 될 때 처음으로 운동선상에 들어온 표면의 묽은, 바꾸어 말하면 자신이 이동할 방향으로 물의 운동에 전달되어야 한다. 결과적으로 먼저 일어나는 표면의 묽은 정지상태에 있는 물이 아니라, 부분적으로는 자신의 이동방향으로 움직이는 물에 대한 마찰이 될 것이며, 그로부터 저항과 같은 것을 경험할 수 없다.

실용적인 면에서 이 실험들이 50ft이상의 더 큰 표면을 다루는 것이 아니라 하더라도, 그들은 이와 같은 길이의 표면저항이 배에서 흔히 일어나게 되는 허용능력을 우리가 예측할 수 있을 만큼 충분한 자료를 제공한다. 50ft길이에서 모든 부가적인 길이에서의 평방ft당 마찰의 감소는 (길이 증가에 따른) 너무 작아서 우리가 그 표면의 마지막 250ft를 통하여 이와 똑같은 비율로 계속 감소한다고 가정하거나, 혹은 50ft 후에 완전히 멈추는 것으로 가정한다 하더라도 300ft 길이의 총 표면저항에 대하여 우리가 평가한 것과 큰 차이가 없을 것으로 보인다; 반면에 결국은 그 두 가지 가정들중 어느 하나가 옳은 것이 확실하다.

곧 Froude는 그가 쾌속선 H.M.S "Grayhound" 에 대해 1871년에 수행한 여러규모 실험

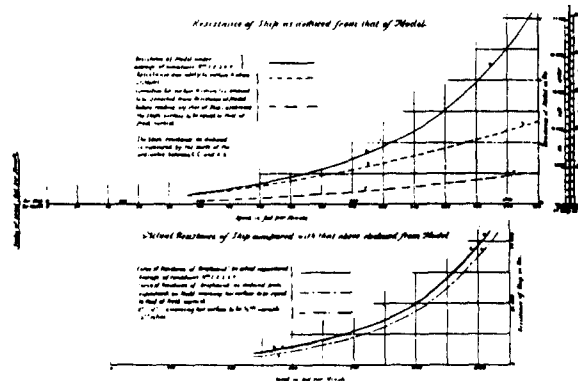
과 비교하기 위하여 한 모형실험을 통하여 그가 고안한 예측방법을 검토할 기회를 가졌다 [10] :

결과적으로 원형 배와 모형의 저항곡선을 비교해 보면 우리가 각각 선택할 수 있는 최선의 대표적인 값은 여러가지 모양 각각에 대하여 결과를 주는 그 곡선의 평균일 것이다; 그리고 이 가정에 앞서 표면마찰에 대한 실험이 제공하는 정확한 자료들은 다음과 같이 비교하는데 소개될 수도 있다. - 그림 18 에서 선 AA축은 다른 모양일 때 저항의 평균인 정규 변위에서 다양한 속력일 때의 Greyhound 모형의 저항을 보여준다. 선 BB 축은 배의 마찰의 질이 이 실험에서 질의 편리한 표준이 된 배의 표면의 질이 같다는 가정하에 실험으로부터 계산된 표면마찰만에 의한 모형저항을 보여준다. 소위 매끄러운 얇은 락업료의 마찰이 사라진다: 결과적으로 그 축의 나머지들은 (즉 AA와 BB선 사이에 포함된 부분) 표면마찰보다 다른 원인들에 의한 저항을 나타낸다. 여기서는 비교법칙을 정확하게 적용한 것이 확실한 것 같다. 그러므로 두 선 AA와 BB사이에 포함된 그 축의 부분은 그 배에 적당한 규모로 해석할 때, 표면마찰이 없는 배의 저항을 옳게 나타낸다. 그때 표면마찰에 따른 배의 저항은 모형에서와 똑같은 방법으로 계산된다; 그리고 그것은 적당한 축척으로 BB선 아래의 축을 측정하므로 CC선에 의해 나타낼 수 있다. 기선 대신에 CC선으로부터 같은 방법으로 측정된 선 AA축은 배의 총 저항을 모형의 총 저항으로부터 추론할 수 있음을 나타낸다.

예측이 절대적으로 완벽한 것이 아니라는 것을 그는 다음과 같이 설명하였다.

이미 언급한 바와 같이, Greyhound 표면 저항의 질을 정확하게 조사하는 것은 쉽지 않지만, 그러나 해가 지남에 따라 부식된 것 칠한 니스보다 훨씬 나쁜 표면의 질을 갖는, 그 곡선이 보여주는 배의 동판을 평가하는 것과 이러한 상황이 배 자체의 저항이 나타내고 있는 그 과도함을 설명할 수 있다는 것이 가능하다.

그 과도함은 그 배에 대하여 가정된 표면이 전체를 새로 칠한 니스로 이루어 졌다고 하는 대신에, 그 면적의 1/3에 대해 - 말하자면, 배의 길이 전부를 그 양면에 5ft너비 조각들로 된 배의 표면과 똑같은 면적에 대하여 표백하지 않은 보통 옥양목 표피로 이루어 졌다면, 그 결과로 생긴 것과 똑 같다고 말할 수 있을 때 유익하게 정량화 될 수 있다. 이런 가정에 따라 계산된 결과는 그림 19의 CC선으로 나타낼 수 있다.

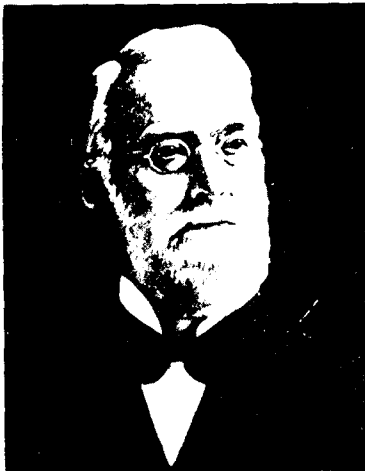


이 설명은 그 배에 극단적인 가정을 할 필요가 없는 표면의 질은 우선 배와 모형사이의 실제적인 비교에서 부득이하게 보이는 비교법칙의 실험으로 간주되는 것을 충분히 보여준다.

[이 그림은 배에 대한 심한 가설을 필요로 하지 않는 어떤 표면의 질이 비교판정으로 간주되는 원형 배와 모형사이의 실제적인 비교에서 일견하여 확정적이지 않게 보인다는 것을 충분히 설명하는 것을 나타내고 있다.]

역사의 아이러니 중 하나는 Froude의 이름이 그가 최초로 한 것이 아닌, 그리고 결코 그가 두번 다시 사용하지 않은 상사법칙 및 무차원수와 불가분의 관계를 맺게 되었다는 사실이다. 반대로 경계층 연구에 대한 그의 매우 큰 공헌은 조선건조분야 밖에서는 지금 거의 언급되지 않고있다. 점성과 중력효과가 함께 결합된 조건하에서의 모형실험 기법을 한 세기 전에 개발한 그 천재는 그 분야에서만 충분히 그 진가를 인정받고 있다.

상대적으로 신생국의 성장하는 기술력을 대표하는 세명의 미국인 기술자인 - Pelton, Herschel, Freeman 에 대하여 이 장에서 논의되어야 할 것이 있다. Lester Allen Pelton (1829-1908) 은 20세의 나이에 Ohio의 Vermillion에 있는 집을 떠나 금을 캐는 대열에 합류하였다. 광산에서 재미를 보지 못하였기 때문에 California의 Camptonville에 돌아와 도광기를 제작하였고, 이때에 그는 그 당시 흔히 사용하던 컵 모양 바켓을 갖는 많은 충격바퀴를 비롯한 기계장치와 관련을 맺었다. 그는 굴 통조림통으로부터 다른 형태의 수차를 만들기도 하고, 바켓을 분해하기도 하면서 그와 같은 바퀴의 효율을 증진시키기 위한 노력을 1878년 겨울동안 하였다고 한다. 이듬해 그는 모형을 만들어 실험하고 상을 수상한 California 대학으로 마침내 여행을 하게되었다. 그의 개선된 수차의 형태는 1880년에 특허를 받았고 그 권리는 후에 그것을 개발하기 위해 설립된, Pelton이 수년동안 고문으로 있던 회사에 팔렸다. Franklin연구소는 1895년 Pelton 수차에 대한 광범한 보고서를 냈으며 그의 과학적 발전에 기여한 공로로 Pelton바퀴의 발명자에게 Elliot Cresson메달을 수여하였다.



Lester Allen Pelton

Clemens Herschel (1842-1930)은 아마도 오스트리아 출생인 것 같다(Vienna와 Boston 모두 그의 출생지로 되어있다). 그리고 그의 교육은 분명히 국제적이었다(Harvard, Paris, Karlsruhe). 그러나 그는 철저히 미국인이었다. 처음에는 여러 분야에 관심을 가진 토목기사였으나 그는 곧 전적으로 수리학에 전념하여 처음엔 Lowell에서 일하고 그때 Holyoke에서 새로운 시험소를 건설하였다. 이어서 그는 New Jersey 물 회사의 주임기사로 근무하였고 미국과 캐나다 양국의 Niagara 수력회사에 고문으로 그리고 Allis-Chalmers Company의 수리 기술자로 봉직하였다. Boston 학회와 ASCE는 그를 회장으로 추대하였다. 1899년에 Herschel은 이탈리아 수도원에서 Frontinus의 희귀한

원고를 발견하였고 사진으로 찍은 원고를 영어로 (특징적인 Herschel의 주석을 단채로) 번

역하였다. 다방면의 수리학 분야에 대하여 다작인 그는 1898년 논문에 설명된 장치인 “벤츄리 메터”로 오늘날 가장 잘 알려져 있다. 이 장치 발명으로 인하여 Pelton과 마찬가지로 그는 Franklin 연구소의 Elliot Cresson 메달을 수여받았다.

Holyoke에서 Herschel은 실제로 공급하는 수량만큼 지역발전회사에 사용량 부과를 할 필요가 있었다. 이는 웨어가 사용될 수 있는 한 상대적으로 간단한 문제였지만 [11]:

인간의 눈으로 보이지 않는, 그래서 나에게는 매우 고민스러운, 수로로부터의 또 다른 도수가 있다. 이것은 척수로서 25개의 큰 신문 제작소를 포함하여 수공업회사에 의하여 사용되는 많은 양이었으며 대략 전력에 사용된 양의 10%정도의 양으로 산정되었다. 이 물은 대부분 직경 20-24in의 바깥면에 검게 페인트칠된 주철관을 통하여 도수되었으며, 그들은 보통 공장의 기초부에 절대 비밀하에 놓였고, 그들 내부에 무엇이 지나가는지에 대하여 매우 귀찮을 정도로 비밀에 부쳐졌다. 나는 그 관 곁에 여러번 서서 숨겨진 이 관들의 비밀을 알 수 있을까를 생각하는데 골몰하였다.

이런 노력들은 이와같은 장치가 어떻게 기능을 하는가를 시험하기 위한 최초의 기회가 되었다: 관의 어떤 지점에 원형 방수관의 형태인 오리피스를 선택적으로 설치하고 오리피스 하류부에 확대 원추관을 설치하여 처음 오리피스에 의해 발생된 수두손실을 회수할 수 있으며, 수두의 어떤 구체적인 손실이 전 장치에 의하여 일어난다.



Clemens Herschel

Herschel 자신이 말한 것처럼 그가 완성한 장치에 대한 기본적인 아이디어는 관의 목부분 압력강하에 대한 Bernoulli와 Venturi의 지적으로부터 최소 손실수두를 일으키는 확산단면에 사용될 부분의 Francis 연구에 이르기까지 모든 문헌에서 얻을 수 있었다. 그러나 이 개념들을 유량측정에 처음 결합한 사람은 Herschel이었다. 그 장치의 명명은 목부분압력 관독을 “Venturi”라 일컫던 그의 실험실에서의 관습으로부터 유래되었던 것으로 보이며 Herschel이 이 용어를 남긴 것으로 보인다. 그는 후에 그 장치를 시험할 때까지 계기 계수를 이론적으로 결정하는데 Bernoulli법칙을 적용치 않았다는 것을 특히 적어놓고 있다:

그러므로 어떤 발명에 따른 원리의 올바른 이해는 그 발명을 앞서가게 하는 대신에 그 발명을 따르게 하는 것 같았다. 이와같은 이해는 결국은 발명가가 되게 할 수 있으며 그로 하여금 철저히 계획하고 실험하게 한다.

Jhon Ripley Freeman(1855 - 1932)은 Herschel과 마찬가지로 철두철미한 미국인였다.

Maine의 West Bridgton의 농장에서 태어난 그는 MIT에서 토목공학을 공부하였고 매사추세츠 제3 발전센터에 있을 때 Hiran F. Mills 아래에서 그의 실질적인 훈련을 받았다. 10년간의 견습기간 후에 그는 공장 화재보험을 취급하는 Boston 회사의 기사이자 감독이 되었다. 그 회사에 고용되어 있는 동안 그는 소방노즐과 호스, 관 및 그 부속장치들의 저항에 대한 매우 정성스런 실험을 하였다. 1889년과 1891년에 발행된 ASCE의 회보에 실린 논문에서 그 노즐실험이 설명되어 있다. “Experiments relation to Hydraulics of Fire Streams” 와 “The Nozzle as an Accurate Water Meter” 는 각각 학회로부터 금메달을 받았다. 그의 사후 40년후까지 출판되지 않았던 관의 자료가 아직도 최상의 현대적인 저항측정 결과와 매우 잘 비교되고 있다. Freeman의 길고 활동적인 생애의 나머지 부분은 공학과 보험회사로 나누어지는데 뒤에 그는 20세기 수리학의 진보에 기여하였다. 그는 ASCE, Boston 토목학회 그리고 미국 기계학회에 가입하여 각각 학회장으로 선출되는 명예를 누렸다는 사실만을 말해두겠다.

19세기는 그 기간의 진보가 과거 모든 세기의 양적인 진보들을 능가하였기 때문에 여러모로 찬란한 실험수리학의 시대였다. 19세기말까지는 어떤 한 유형이 표준수리학 논문에서 (Flamant’s Hydraulique[13]와 같은) 세가지 기본법칙의 향으로 - 연속성, 에너지, 운동량 - 수렴되었다. 무차원계수들이 상당히 흔하게 사용되었고, 무수한 실험자료들이 무차원계수들을 평가하기 위하여 얻어졌으며, 일반적으로 성공적이지 못하였다하더라도 어떤 물리적 기반위에서 그들의 변화를 공식화하기 위한 시도들이 있었다. 부등부정류 개수로 흐름의 더 복잡한 문제들이 부분적인 성공을 거두면서 마침내 공략당하였다. 그러나 더우기 과학은 물을 사용하기 위한 사업의 설계가 - 발전, 주운, 도시의 소비용수 등과 같은 - 순전히 정성적 기반위에서, 보다 합리적인 정량적 기반위에서 (Du Baut 가 100 여년 전에 전망했던 바와 같이) 이루어질 수 있는 점에까지 도달하였다. 그러나 이 기간 전체를 통하여 어떤 한 방식이나 “응용실험수리학”을 위한 자금을 조성하고자 하는 Clemens Herschel의 의지를 표현한 다른 관점이 영향을 끼치고 있었다.[12]

나는 모색하고 있는 맹목적인 연구가 응용과학에 선행하여야 한다는 주장을 잘 알고 있다. 그러나 나는 실용적인 발명이 훨씬 더 종종 그들의 과학적 설명을 앞서 간다는 것을 발견하였다. 반면에 맹목적인 연구는 단지 그 인쇄물이 도서관의 서가를 차지하는 것에 불과한 경우가 너무 흔하다. 수 세기동안 전혀 불모인 분야라는 것이 입증된 이론 수리학적 연구...

## 참 고 문 헌

- [1] Darcy, H. P. G., *Recherches experimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux*, Paris, 1857.
- [2] Dupuit, A. J., *Traite theorique et pratique de la conduite et de la distribution des eaux*, Paris, 1865.
- [3] Darcy, H., and Bazin, H., *Recherches hydrauliques: 1<sup>re</sup> partie, recherches experimentales sur l'ecoulement de l'eau dans les canaux decouverts; 2<sup>e</sup> partie, recherches experimentales relatives aux remous et a la propagation des ondes*, Paris, 1865.
- [4] Ganguillet, E. and Kutter, W. R., "Versuch zur Aufstellung einer neuen allgemeinen Formel fur die gleichformige Bewegung des Wassers in Canalen und Flussen," *Zeitschrift des Oesterreichischen Ingenieur-und Architekten-Vereins*, 1869; published as book, Berne, 1877; translated by Hering and Trautwine, New York, 1889.
- [5] Manning, R., "Flow of Water in Open Channels and Pipes," *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, Vol.20, 1890.
- [6] Reynolds, O., "On Certain Laws Relating to the Regimen of Rivers and Estuaries, and on the Possibility of Experiments on a Small Scale," *Third International Navigation Congress*, Frankfort, 1888.
- [7] Vernon-Harcourt, L. F., "The Principles of Training Rivers through Tidal Estuaries, as Illustrated by Investigation into the Methods of Improving the Navigation Channels of the estuary of the Seine", *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol.45, 1889.
- [8] Abell, W., "William Froude", *Transaction of the Institution of Naval Architects*, Vol.76, 1934.
- [9] Froude, W., "Experiments on the Surface-friction experiencd by a Plane moving through Water," *British Association for the Advancement of Science*, 42nd Meeting, 1872.
- [10] Froude, W., "On Experiments with H.M.S. 'Greyhound'", *Transactions of the Institution of Naval Architects*, Vol. 16. 1874.
- [11] Herschel, C., "The Venturi Water Meter: An Instrument Making Use of a New Method of Gauging Water; Applicable to the Cases of Very Large Tubes, and of a small Value only, of the Liquid to be Gauged", *Transactions American Society of*

*Civil Engineers*, Vol. 17, 1887.

[12] "Herschel Will Cites Need for Hydraulic Research," *Engineering News Record*, Vol. 105, No.1, 1930.

[13] Flamant, A., *Hydraulique*, Paris, 1891; 2nd edition, 1900.