



특별기고 - 배와 역학 (2)

글 : 충남대학교 이승준 명예교수 / sjoonlee3204@gmail.com

본 기고문은 학회 미래기술연구소 보고서 2023-002호를 전재한 글입니다. SNAKZINE에 두 호(3월호, 5월호)에 걸쳐 연재됩니다. '배와 역학 (1)'은 3월호에 게재되었습니다.

4. 열역학

열역학은 위에서 생각한 재료역학 또는 동역학과 조금 다른 면이 있다. 앞에서 고려한 재료역학 또는 동역학은 그 이론적 체계가 먼저 갖추어진 후에 그 지식의 응용이 활성화되었지만, 열역학은 열기관(heat engine)의 대표로 볼 수 있는 증기기관이 먼저 만들어지고 그 후에 이론 체계가 발전하기 시작하였다. 연료를 태워서 얻은 열(heat)을 일(work)로 바꾸는 역할을 하는 기관(engine)은 18세기 말 이후의 산업혁명을 가능하게 하였으며 결국 인류의 생활에 본질적인 변화를 가져왔다. 18세기에서 19세기로 넘어가는 전환점의 유럽은 혁명적인 분위기에 압도당하고 있었다고 할 수 있다. 유럽 대륙은 1789년 프랑스 혁명의 여파로 몸살을 앓고 있었고, 영국은 산업혁명에 따른 변화의 물결에 휩싸여 있었다. 이러한 분위기 속에서 변화의 핵심 요인이었던 증기기관과 관련된 열역학의 발전이 이루어졌으며, 열역학은 열과 일을 그 주제로 삼는다는 점에서, 그 자체로 뉴턴에 의해 대표되며 속도, 가속도, 힘, 만유인력, 운동을 주제로 하는 기존 역학에 대한 혁명인 셈이었다. 열역학의 기원에 대해서는 '조선공학의 시발'¹³⁾ 'Thermodynamics의 기원'¹⁴⁾을 참조하기를 바란다.

열역학(thermodynamics)이라는 용어는 1849년 켈빈(Kelvin, 1824-1907)에 의해서 만들어졌으며, thermo-dynamic engine이라는 용어에서 유래하였는데, thermo는 그리스어로 열을 뜻하고, dynamic은 일(당시의 영어로는 power)을 의미한다. 한편, 19세기 초반에는 열기관으로부터 얻는 일을 열(heat)의 dynamic effect라고 불렀으므로, 열역학은 말 그대로 '열과 일에 대한 학문'이라고 할 수 있다. 열역학의 초기 발전 역사에 관해 자세하고도 정확하게 기술한 Cardwell(1971)¹⁵⁾의 책 제목을 아래에 보였는데, 이 제목은 그 자체로 뜻하는 바가 각별하다.

From Watt to Clausius:

The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age

와트로부터 클라우지우스까지: 초기 산업 시대 열역학의 흥기. (이승준 역)

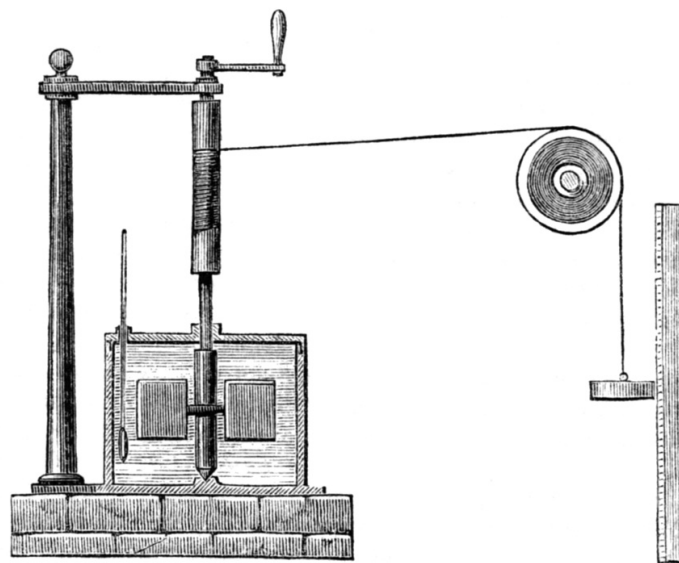
와트(Watt, 1736-1819)는 증기기관을 제작하여 1784년을 기점으로 상업화에도 상당한 성공을 거두기 시작하였다. 그는 기존의 대기기관(atmospheric engine)에 응축기(condenser)를 도입하는 등 매우 본질적인 변혁을 가하여 증기기관을 만드는 데 성공하였지만, 그의 기관의 효율은 2%에도 미치지 못하였다. 차후 열역학은 증기기관의 효율을 높이려는 많은 사람의 노력으로 만들어졌다고 볼 수 있으며, 이 과정 중에 잘 알려진 두 법칙, 즉 에너지 보존 법칙과 엔트로피(entropy) 증가 법칙이 얻어졌는데, 1865년 둘째 법칙을 알아내고 엔트로피라는 용어를 만든 클라우지우스(Clausius, 1822-1888)는 열역학의 이론 체계를 대체로 완성하는데 마지막 결정타를 날린 사람으로 볼 수 있다. 따라서 위의 제목은 와트에 의해 문이 열리고 클라우지우스에 의해 길이 열린 열역학의 역사에 관한 책 제목으로 매우 적절하다고 생각된다.

증기기관을 배의 추진에 사용하고자 하는 의도는 매우 일찍부터 있었다. 다니엘 베르누이(Daniel Bernoulli, 1700-1782)는 1752년 증기기관과 일종의 나사 프로펠러(screw propeller)를 조합하는 추진 방식을 제안한 바 있었으며, 최초로 증기기관을 외륜(paddle wheels)과 조합하여 배의 추진에 성공한 것은 1783년 de Jouffroy d'Abbans(1751-1832) 후작으로 볼 수 있다. 그의 배는 길이 150 ft, 배수량 163 톤이었으며, 리용(Lyon) 부근의 소온(Saone) 강에서 시험 항해에 나선 것으로 알려져 있고, Pyroscaphe(fire boat)¹⁶⁾라고 명명되었다. 그러나 불행히도 그는 프랑스 혁명에 휩쓸려 그 업적을 인정받지 못하다가 그의 사후 1840년이 되어서야 프랑스 과학아카데미에 의해 인정되었다.

당시 증기기관을 배의 추진에 사용하기 위해서는 기관의 동력을 추진기에 연속적으로 전달될 수 있도록 하는 크랭크를 사용한 회전기관(rotative engine)이 요구되고 있었으며, 이는 와트에 의해 늦어도 1778년까지는 이루어졌을 것으로 생각되고 있다. 잘 알려진 바와 같이 실제로 상업적으로 성공한 최초의 증기선(steamboat)은 1807년 첫 항해에 나선 풀톤(Fulton, 1765-1815)의 North River¹⁷⁾호인데, 이 배는 와트의 19 마력짜리 증기기관과 현측외륜(side wheels)을 사용하여 추진되었고, 길이 142 ft, 배수량 121 톤이었으며, 평균 시속 8 km/h를 낼 수 있던 것으로 보고되었다. 풀톤의 증기선이 보여준 상업적 성공은 1819년까지만 해도 오직 9척의 증기선이 허드슨강에서 영업하고 있었으나, 1840년이 되면 100 척 이상의 증기선이 운항하고 있었던 것으로부터도 확인할 수 있다.

19세기 전반 증기기관을 사용하는 배의 숫자가 대량으로 증가함에 따라 증기기관의 낮은 효율¹⁸⁾은 점차 심각한 문제가 되었다. 특히 증기기관의 상업적 이용에 뒤처졌을 뿐만 아니라 양질의 석탄 광산을 가지지 못한 프랑스와 같은 나라에서는 더욱 심각한 문제가 되었다. 증기선과 거의 동시에 발전한 증기기관을 이용한 기차와 관련된 철도 산업은 조선 산업과 더불어 국가의 물류와 교통망의 수준을 결정하고 있었으므로, 증기기관을 포함한 열기관의 최대 효율을 결정하는 인자에 관한 연구 및 열역학의 체계를 정립하는 일은 실질적으로 시급한 문제였다.

에너지(energy)라는 개념은 열역학 제1 법칙과 관련하여 19세기 전반에야 보편화되었는데, 그 시초는 라이프니츠가 17세기 말에 사용했던 vis viva(living force)로 거슬러 올라간다. 물체의 질량을 m , 속도의 v 크기를 라고 할 때, 그는 mv^2 을 사용하여 운동을 해석하고자 하였으며, 이를 라틴어로 vis viva라고 불렀다. 1807년 영(Young, 1773-1829)은 energy라는 용어를 처음 도입하였으며, 이 단어는 그리스어로 at work, 즉 activity의 뜻을 가지는데, vis viva가 힘을 뜻하여 혼동의 우려가 있었으므로, 이를 새로운 용어 에너지로 바꾸어 부를 것을 제안하였다. g 를 중력가속도, h 를 기준 수평면으로부터 연직 상방으로 켜 물체까지의 거리라고 할 때, 코리올리스(Coriolis, 1792-1843)는 1829년 mgh 와 관련하여 일(work, 불어로 travail)이라는 용어를 도입하였고, vis viva, 즉 영이 에너지라고 부른 양의 반을 처음으로 운동 에너지(kinetic energy)라고 불렀다. 그는 일과 운동 에너지의 개념을 사용하여 오늘날 우리가 일-에너지 원리(work-energy principle)라고 부르는 기계적 에너지(mechanical energy)¹⁹⁾ 보존에 관하여 최초로 기술하였다. 포텐셜 에너지(potential energy)²⁰⁾라는 용어는 가장 늦게 1853년 랭킨(Rankine, 1820-1872)에 의해 도입되었으며, 이와 같은 상황으로부터 과학계가 새로운 개념을 수용하는 것이 얼마나 어려운 일인지를 잘 알 수 있다. 에너지 보존 법칙에 도달하기 위해서 19세기 전반의 과학자들이 우선 이해해야만 했던 것은 열(heat)이 일과 마찬가지로 에너지의 한 형태라는 사실이었는데, 이를 받아들이고 활용할 수 있게 되기까지 그야말로 많은 학자가 실수에 실수를 거듭하였다. 열과 일의 호환성은 주울(Joule, 1818-1889)과 마이어(von Mayer, 1814-1878)에 의해 밝혀진 것으로 볼 수 있다. 오늘날 우리가 열의 일당량(mechanical equivalent)이라고 부르는 것을 주울은 1843년의 논문에서 열의 역가(mechanical value)라고 불렀으며, 1845년에는 오늘날의 값과 거의 같은 의 값을 얻었다(그림 4 참조). 마이어는 1842년의 논문에서 생물계를 포함한 더욱 광범위한 체계에 대해 에너지 보존이 성립함을 보이기 위해 노력하였다. 열과 일은 에너지의 다른 형태일 뿐이고, 에너지는 본질적으로 파괴 불가능인 양이며, 그 형태를 바꿀 수 있을 뿐이라고 주장하였는데, 일-에너지 원리는 더 일반적인 에너지 보존 법칙의 일부인 것을 보이고자 하였다. 다만 그가 추정한 의 값은 정확한 값과 상당한 차이를 보였으므로, 결국 열역학 제1 법칙은 주울과 마이어 두 사람의 공동 발견으로 귀착되었다.



<그림 4 주울(1845)이 사용한 열의 일당량을 구하기 위한 실험 장치>

제1 법칙이 정립되어 열과 일이 에너지의 다른 형태인 것을 알게 된 것은 1850년 무렵으로 볼 수 있는데, 열기관에 대한 연구도 1784년 와트의 증기기관 이래로 병행하여 진행되고 있었으므로, 돌이켜보면 열의 본질에 대한 이해가 없는 가운데 효율에 관한 연구가 이루어진 셈이었다. 카르노(Sadi Carnot, 1796-1832)는 1824년 그의 유일한 저술<Reflexions>에서 열기관의 최대 효율과 관련하여 카르노 사이클(cycle)을 제안하였다. 기관이 지속해서 작동하기 위해서는 작동물질(working substance)²¹⁾이 주기적으로 변화하는 기전에 근거해야 하는데, 이 기전의 속성을 사이클로 나타내기로 하고, 열전달이 일어날 때의 손실을 최소화하는 과정(process)으로 구성된 이상적인 사이클을 고려하였다. 작동물질로 또는 작동물질로부터 열전달이 일어날 때는 등온과정(isothermal process), 작동물질이 일을 하거나 일을 받을 때는 단열과정(adiabatic process)으로 진행되는 것으로 가정하고, 두 개의 등온과정과 두 개의 단열과정으로 이루어진 사이클, 즉 카르노 사이클을 제안하였다. 열전달이 등온과정에서 일어나도록 온도가 일정하게 유지되는 고온과 저온 두 개의 열원(heat reservoir)을 도입하였으며, 이는 와트의 증축기에서 영감을 얻은 것으로 알려져 있다. 그는 열기관을 고온(T_H)의 열원에서 열($=Q_H$)을 받고 저온(T_C)의 열원에 열($=Q_C$)을 주며, 팽창에 해당하는 단열과정에서 일($=W$)을 하는 기계로 이상화하였다.

카르노 사이클로 작동되는 기관을 카르노 기관이라고 부르는데, 카르노는 이 기관이 가역적(reversible)이며, 그 효율($\eta=W/Q_H$)은 작동물질의 종류에 무관하게, 두 열원의 온도에 따라서만 결정되며, 두 온도 사이에서 작동되는 어떠한 기관도 카르노 기관의 효율보다 클 수 없음을 입증하였다. 단 그는 아직 열을 에너지의 한 형태라고 생각하지 않고 있었고, 와트가 자신이 만든 증기기관으로부터 얻어 낼 수 있는 일을 계산하는 데 사용했던 지시선도(indicator diagram)²²⁾에 대해서도 모르고 있었으므로, 오늘날 우리가 열역학에서 배우는 것과 같은 카르노 기관의 효율을 구할 수는 없었다. 그러나 정교하면서도 엔지니어의 감각을 이용한 논리의 전개로 다음과 같은 중요한 결과를 얻었다. 카르노 기관의 효율은 두 열원 사이의 온도 차($\Delta T=T_H-T_C$)에 따라 결정되며 온도 차가 클수록 효율이 크다. 따라서 고압 증기기관의 높은 효율은 증기의 높은 압력보다는 높은 온도에 기인하는 것인 점을 지적하였다. 나아가 작은 온도 변화에도 압력이 매우 크게 변화하는 증기보다는 작은 압력 변화에도 큰 온도 변화가 발생하는 공기를 이용한 기관의 효율이 크다. 이 결과는 19세기 후반, 공기를 작동물질로 볼 수 있는 내연기관의 발달로 연결되었다.

카르노의 사후 1834년, 클라페롱(Clapeyron, 1799-1864)은 지시선도에 카르노 사이클을 표시하고 작동물질로 이상기체(ideal gas)를 사용하여 카르노 기관의 효율과 관련하여 매우 유익한 정량적인 정보를 얻었으나, 그도 역시 열을 에너지의 한 형태로 보고 있지 않았으므로, 카르노와 본질적으로 다른 결과를 얻을 수는 없었다. 주울과 마이어에 의해 제1 법칙이 정립된 1850년을 전후하여, 카르노와 클라페롱의 결과는 켈빈(Lord Kelvin, 1824-1907)과 클라우지우스(Clausius, 1822-1888)에 의해 새로운 관점, 즉 에너지 보존의 관점에서 다시 해석되기 시작하였다. 켈빈은 차후 1890년에 나온 카르노의 저술 영역판<Reflections>²³⁾에 해설을 실을 정도로 카르노의 결과를 중시하였는데, 카르노 사이클의 효율이 작동 물질에 독립인 점에 착안하여 물, 또는 특정한 기체와 무관한 온

도를 정의하고자 하였고, 이러한 시도의 결과로 절대온도(absolute temperature)가 도입되었다. 켈빈은 1854년 이상기체의 상태 방정식과 카르노 기관의 효율에 절대온도를 사용하여 $\frac{Q_H}{Q_C} = \frac{T_H}{T_C}$ 즉 $\frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_C}{T_C}$ 를 얻었으며, 이를 이용하여 카르노 기관의 효율에 대해 $\eta = (Q_H - Q_C)/Q_H = 1 - T_C/T_H$ 를 얻었다. 나아가 기관으로부터 방출되는 열 Q_C 의 부호를 음으로 취하면 $\oint \frac{dQ}{T} = 0$ 을 얻음을 보였고, 이 식을 열역학 제2 법칙이라고 생각하였다. 클라우지우스는 1865년 위 결과, $\oint \frac{dQ}{T} = 0$ 를 일반화하여 가역과정으로 구성된 사이클, 즉 가역사이클에 대해 $\oint \frac{dQ}{T} = 0$ 을 얻었으며, 비가역과정으로 이루어진 사이클에 대해서는 좌변이 영보다 작아야 한다는 논리로부터 모든 사이클에 대해 클라우지우스 부등식(Clausius inequality)이라고 불리는 식, $\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$ 을 얻었다.²⁴⁾ 클라우지우스는 가역사이클에 대해서 성립하는 식, $\oint \frac{dQ}{T} = 0$ 으로부터 새로운 상태량 S 의 변화량에 대해 $dS = \frac{dQ}{T}$, 즉 $dQ = TdS$ 가 됨을 얻었다.²⁵⁾ 나아가 그는 S 가 에너지 변환(transformation)에 관련된 양임에 주목하여 변환을 뜻하는 그리스어 *tropy*를 택하고, 제1 법칙의 핵심용어인 에너지로부터 *en*을 택하여, 제2 법칙의 핵심용어인 S 를 엔트로피(entropy)라고 명명하였다. 새로운 상태량인 엔트로피를 사용하면 클라우지우스

부등식으로부터 모든 과정에 대해 $S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{dQ}{T}$ 를 얻는데, 여기서 하첨자 1과 2는 과정의 시작과 끝에 상응하는 상태를 나타낸다. 위의 결과를 외부와 열교환이 없는 고립계에 적용하면 $dQ=0$ 이므로 우변이 영이 되어 $S_2 \geq S_1$ 를 얻는다. 이 식은 고립계의 경우 엔트로피가 감소할 수 없다는 것을 뜻하는데, 비가역과정에 대해서는 엔트로피가 증가해야 하는 것을 뜻하므로, 클라우지우스 부등식으로 대표되는 열역학 제2법칙은 보통 엔트로피 증가 법칙이라고 부른다. 열역학에 관한 최초의 교재는 공학도 특히 조선공학도를 위해 1859년 랭킨이 저술한 <증기기관과 기타 기관에 대한 편람[A Manual of the Steam Engine and other Prime Movers]>의 일부로 출판되었다. 이 책의 가장 주요한 부분인 3부의 제목은 '증기기관 및 다른 열기관에 대하여(Of steam and other heat engines)'로 되어 있는데, 이 3부의 3장이 바로 열역학에 대한 부분으로 그 제목은 '열역학의 원리(Principles of thermodynamics)'이다. 열역학이라는 용어가 만들어진 지 이제 10 년도 채 되지 않은 시점이었는데, 이 3장의 1절은 '열역학의 두 법칙에 관하여(Of the two laws of thermodynamics)'라는 제목을 가지고 있으며 그 시작 부분에서 랭킨은 열과 기계적 에너지의 교환성에 대해 언급한 뒤 다음과 같이 열역학을 정의하였다.

The reduction of the laws according to which such phenomena take place, to a physical theory, or connected system of principles, constitutes what is called the SCIENCE OF THERMODYNAMICS.
그와 같은(열과 기계적 에너지의 교환) 현상의 발생이 근거하는 법칙들을 물리 이론 또는 연계된 원리 체계로 환원하는 것을 열역학의 과학이라고 부른다. (이승준 역)

그가 1절의 제목에서 언급한 두 법칙의 내용은 바로 에너지 보존 법칙과 엔트로피 증가 법칙이었는데, 제1 법칙에 대해 다음과 같이 기술하고 있다.

First law of thermodynamics - heat and mechanical energy are mutually convertible; and heat requires for its production, and produces by its disappearance, mechanical energy in the proportion of 772 foot-pounds for each British unit of heat: 열역학 제1 법칙 - 열과 기계적 에너지는 서로 교환할 수 있다; 열은 그 생성에 기계적 에너지를 요구하며, 그 소실에 따라 기계적 에너지를 생성하는데, 그 비율은 단위 BTU 당 772 foot-pounds이다. (이승준 역)

열이 에너지의 한 형태이고, 일과 같이 에너지로 다룰 수 있다는 것 자체를 제1 법칙이라고 부르고 있는 것을 알 수 있으며, 이는 19세기 전반에 있었던 열과 관련된 혼란스러웠던 논란을 반증하고 있는 것으로 보인다. 한편, 제2 법칙에 대해서는 랭킨이 사용한 용어와 개념이 오늘날 우리가 익숙한 것과는 너무 달라서 여기에 소개하기도 힘들 정도이며, 1859년만 하더라도 아직 제2 법칙의 본질과 그 함의가 널리 제대로 알려지지 않았던 것을 미루어 알 수 있다. 제1 법칙이 알려지지 않은 상황에서 열역학의 기초를 쌓았던 카르노에 대해 Cardwell(1971)은 재료역학이나 동역학과 관련하여 갈릴레오가 수행했던 역할에 비교하여 다음과 같이 평하고 있다.

If Carnot could have achieved all this it would have been much the same as if Galileo had rounded off <Two New Sciences > by writing <Principia Mathematica >and <Opticks >. 만약 카르노가 이 모든 것(열역학의 체계)을 이루었다면, 이는 마치 갈릴레오가 <두 새로운 과학>을 (뉴턴의 저서인) <프링키피아>와 <광학>으로 마감하는 것과 같았을 것이다. (이승준 역)

이처럼 열역학에 관해 마치 동역학의 갈릴레오에 상응하는 인물로 여겨지는 카르노는 1824년 그의 저술에서 증기기관의 중요성에 대해 다음과 같이 기술하였다.

The steam-engine is now more important for England's existence than is her Navy.
영국의 존속을 위해 증기기관은 이제 그 해군보다도 더 중요하다. (이승준 역)

19세기 초 기선이 도입되면서 증기기관은 배의 동력원으로 자리 잡았고, 따라서 중요성이 매우 커진 증기기관의 효율을 높이기 위한 노력에 힘입어 열역학은 그 토대를 세울 수 있었다. 열역학은 역학이라고 불리면서도 뉴턴의 운동 법칙에 근거하지 않는 최초의 역학이었으며, 주울과 마이어, 그리고 켈빈과 클라우지우스에 의해 19세기 중엽 가장 기본적인 두 법칙이 얻어지면서 그 성립에 큰 전환점을 마련할 수 있었다. 문명은 에너지를 어떻게 사용하느냐에 따라 결정된다고 한다. 만약 에너지 보존과 다양한 형태를 가진 에너지 사이의 변환에 대한 법칙을 이해하고 활용할 수 없다면 조선공학자는 고사하고 시대에 부응하는 한 사람의 공학자(engineer)로서도 그 역할을 제대로 해내기가 쉽지 않을 것이다.

5. 유체역학

유체역학(fluid mechanics)이라는 단어는 20세기 초부터 쓰이기 시작했으므로, 이 글에서 생각하고 있는 4대 역학 중에서 가장 늦게 자리를 잡았다. 그러나 유체(fluid)라는 단어는 그리스 시대부터 이미 사용되고 있었다. 지구 상의 물질을 구성하는 4대 원소에 물(water)과 공기(air)가 포함되어 있었는데, 물과 공기 모두 일정한 형태를 가지지 않으며 흐르는 특성을 가진 것에 주목하여 둘을 통칭하는 데 사용되었다. 유체역학의 역학(mechanics)이라는 단어도 아리스토텔레스와 아르키메데스에 의해 대표되는 그리스 시대부터 사용되었는데, 오일러가 1736년 <Mechanica>에서 밝힌 것처럼 원래는 '기계(machine)와 관련된 힘의 평형에 관한 학문'을 뜻하였

으나, 점차 ‘물체의 운동에 대한 과학’이라는 뜻으로도 쓰였다. 오일러는 전자를 정역학(statics)이라고 부르고, 후자만을 역학(mechanics)으로 부르겠다고 하였으며, 이와 같은 관행은 지금까지도 지켜지고 있다. 따라서 유체역학은 ‘유체의 운동에 대한 과학’을 뜻한다고 할 수 있다. 유체역학의 기원에 대해서는 <역사로 배우는 유체역학>²⁶⁾ ‘Fluid mechanics의 기원’²⁷⁾을 각각 참조하기를 바란다.

인류가 배를 사용한 것은 구석기 시대부터이므로 비교적 가벼운 물체가 물 위에 뜬다는 것은 구석기 시대 사람도 알던 사실이지만, 부력의 원리가 아르키메데스에 의해 두 권으로 된 <부유체에 관하여(On floating bodies)>를 통해서 알려진 것은 기원전 3세기 무렵이었다. 배와 관련하여, 부력의 원리가 발견되기 전과 후의 차이는 무게와 부력의 크기에 대해 정량적인 생각이 필요하게 된 것이었다. 배의 수면 아래 체적을 근사적으로라도 계산할 수 있다면 배에 실을 수 있는 화물의 최대 중량을 배를 짓기 전에 미리 알 수 있었으므로, 경험에 의하지 않고도 배의 안전을 확보할 수 있게 되어 꽤 커다란 이점이었을 것이다. 수정역학(hydrostatics)은 이처럼 부력과 관련된 문제를 다루었으며, 아르키메데스 이래로 잘 알려진 지식이었다.

부력과 관련하여 두 가지 흥미 있는 사실을 짚고 넘어가기로 한다. 첫째는 <부유체에 관해서>에서 아르키메데스는 고려 중인 매체로 물이 아니라 유체를 일관되게 생각하고 있다. 부력의 원리는 1권의 명제 5로 다음과 같이 주어졌다.²⁸⁾

Proposition 5

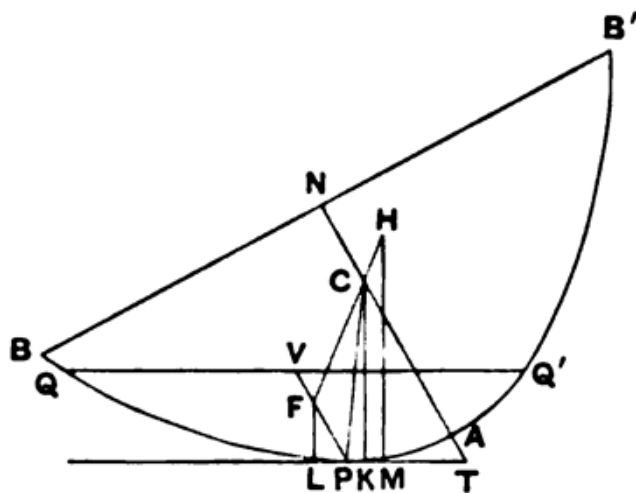
If a body which is lighter than a fluid is placed in the fluid, it will be immersed to such an extent that a volume of fluid which is equal to the volume of the part of the body immersed has the same weight as the whole body.

명제 5

유체보다 가벼운 물체가 유체 중에 놓여 있다면, 물체의 잠겨진 부분의 체적과 같은 체적의 유체가 물체 전체의 무게와 같아질 때까지 물체는 잠길 것이다. (이승준 역)

현대적으로 표현하면, ‘유체 중에 놓인 물체는 물체가 배제한(displace) 유체의 무게만큼의 연직 상방의 힘을 받는다’라고 할 수 있는데, 원문 중에는 사실 ‘배제한’다는 표현은 전혀 찾아볼 수 없다. 어찌 되었든 유체 중에 놓인 물체라고 하였으므로, 물뿐만 아니라 공기 중에 있는 물체도 부력을 받을 수 있다는 것을 의미하였는데, 이와 관련하여 공기의 무게가 있는지, 또는 있다면 얼마나 되는지에 대한 의문이 생겼으며, 이 문제는 갈릴레오에 의해 <두 새로운 과학>에서 다루어진 바 있다. 나아가 토리첼리(Torricelli, 1608-1647)²⁹⁾의 진공 실험도 공기의 무게와 관련하여 갈릴레오의 권유에 따라 이루어진 것이었다. 둘째는 아르키메데스 당시에는 부력이 발생하는 원인에 대해서는 전혀 알려진 바가 없었으므로, 비록 아르키메데스가 위의 명제 5에 대한 증명을 제공하였지만, 그의 부력에 대한 발견은 오랫동안 원리(principle)로 불렸다. 여기서 원리는 증명이 필요 없는 명제임을 뜻한다. 1687년 뉴턴의 <프링키피아>를 통해서 중력(gravity)이 알려지고, 1749년 오일러가 <선박과학>에서 유체 내부에 작용하는 내력으로서 압력(pressure)의 개념을 제안하면서, 부력은 더 이상 발생 원인을 알 수 없는 개념이 아니게 되었지만, 2,000 년 이상 원리라고 불려온 관례를 따라 지금도 원리라고 부르고 있다.

아르키메데스는 <부유체에 관해서>의 2권에서 그가 기하학적으로 다룰 수 있었던 곡선 중 배의 외곽선 모양과 가장 비슷한 포물기둥(parabolic cylinder)³⁰⁾의 복원성 또는 안정성(stability)에 대해 고찰하였다. 10 개의 명제를 통해 다양한 자세로 유체 중에 놓인 포물기둥이 원래의 직립 자세로 돌아갈 것인지 아니면 전복될 것인지에 대해 논의하고 있다. 무게중심(center of gravity)과 부심의 상대적 위치에 따라 여러 가지로 경사한 물체의 안정성을 판정하고 있으며, 그림 5에는 명제 2와 관련된 도형을 보였다. 그림에 보인 것과 같이 주어진 물체에 대해 점 H 가 무게중심일 때, 점 F 가 부심인 것을 보임으로써 경사한 물체는 직립 위치로 돌아갈 것임을 증명하였다. 당시에는 아직 모멘트의 개념이 없었지만, 지레의 원리를 확장 사용하여 모멘트가 작용할 때의 현상을 기술할 수 있었다. 포물선의 기하학적 특성에 관한 연구는 <포물선의 면적 구하기(Quadrature of the parabola)>에서 이미 선행적으로 상당 부분 이루어졌으므로 아르키메데스는 <부유체에 관해서>를 쓰기 위해 꽤 오랫동안 준비한 것으로 볼 수 있다.



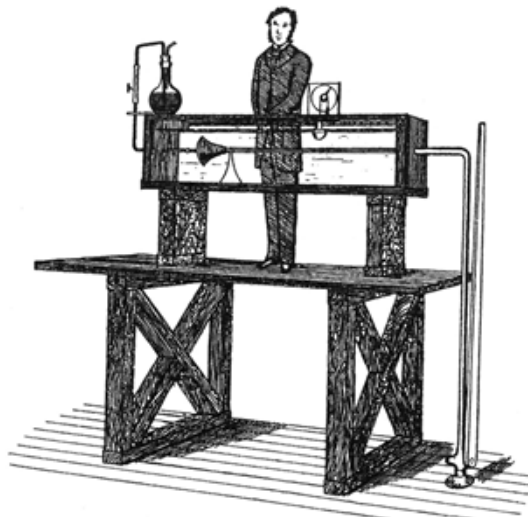
<그림 5 아르키메데스가 <부유체에 관하여> 2권 명제 2에서 고려한 포물기둥의 복원성, Heath(1897)로부터>

기하학과 지레의 원리라는 지극히 제한된 방법론만을 활용하여 기원전 3세기에 배의 복원성에 대한 고찰을 수행한 아르키메데스의 업적은 후세 사람들이 그를 인류 최초의 엔지니어라고 부르게 한 원인이 되었다. 하지만 이러한 방법론의 제한성은 아르키메데스 이래로 줄곧 지속되었으며, 17세기를 살던 갈릴레오에게도 똑같이 적용되고 있었다. 오늘날 우리가 과학혁명이라고 부르는 변화는 뉴턴과 라이프니츠에 의해 미적분이 도입되고 또 뉴턴에 의해 운동의 법칙이 알려지고 나서야 드디어 가능하게 되었다. 아르키메데스가 사용하였던 복원성에 대한 논리는 이제 포물기둥과 같이 수학적인 식으로 주어지지 않은 형태의 배에도 미적분을 사용하여 그대로 적용할 수 있게 되었으며, 정적 복원성(static stability)뿐만 아니라 운동의 법칙을 사용하여 배의 동적 복원성(dynamic stability)에 대해서도 고려할 수 있게 되었다.

2장에서 이미 기술한 바와 같이 부력은 <선박개론>에서 아르키메데스의 방법을 그대로 적용하여 메타센터를 정의하였고, 배를 짓기 전에 배의 안정성을 확보하는 방법을 마련하였다. 또한 오일러는 <선박과학>에서 강체의 운동 방정식을 논의한 뒤 최초로 배의 횡동요에 대한 운동 방정식을 얻었다. 그러나 배와 관련된 좀 더 실제에 가까운 문제들을 해결하기에는 유체를 어떻게 해석적으로 다룰 것

인지에 대한 보다 다양한 지식을 축적해야 했다. 베르누이(Daniel Bernoulli, 1700-1782)가 1738년 <수동역학{Hydrodynamica}>을 저술한 이래 수동역학이라는 이름으로 불린 이론적인 분야의 연구는 19세기 말까지도 유체의 점성(viscosity)과 관련된 문제에 대해 이렇다 할 도움을 주지 못하였다. 오일러가 유체의 점성을 무시하여 비점성 유체에 대한 운동 방정식을 얻고 유동이 비회전성이라는 가정을 도입하여 포텐셜 유동(potential flow)에 대한 해석을 전개하였으나 매우 제한적인 경우에만 도움이 되었다. 한편, 로마 시대 이래로 급수 체계의 건설을 위해 관(pipe), 개수로(open channel) 등에서의 유동에 관한 지식이 축적되었으나, 주로 실제의 토목 공사를 위한 실용적인 자료들이 얻어졌으며, 이처럼 실험적인 방법에 의존하여 유동과 관련된 실제적인 결과를 얻고자 했던 분야는 보일(Boyle, 1627-1691) 이래로 수력학(hydraulics)이라고 불렸다.

19세기 중엽은 배의 역사라는 관점에서 보면 가장 큰 변화가 발생한 시기였다. 나무로 만든 배를 돛으로 움직이던 목범선의 시대로부터 쇠로 만든 배를 증기기관과 외륜 또는 프로펠러로 움직이는 철강기선의 시대로 들어섰다. 이와 같은 변화는 근대적인 의미의 조선 공학이 싹트게 하였을 뿐만 아니라 관련 역학의 발전도 부추기게 되었다. 코쉬(Cauchy, 1789-1857)는 1822년 유체 내부의 임의의 점에 작용하는 힘을 응력 텐서(stress tensor)를 사용하여 나타내었으며, 스토크스(Stokes, 1819-1903)는 1845년 응력 텐서를 이용하여 점성 유체에 대한 운동 방정식을 유도하였는데, 나비에(Navier, 1785-1836)는 1821년 같은 식을 약간은 의문스러운 가정에 근거하여 유도하였으므로, 이 식은 보통 나비에-스토크스 방정식(NS 방정식)으로 불린다. 단 문제는 NS 방정식을 풀어서 그 해를 얻을 수 있는 경우가 매우 제한적이었으므로 실제적인 도움이 되었다고 말하기는 힘들었다. 더구나 유체의 유동은 관성력과 점성력의 상대적인 중요도에 따라 층류(laminar flow)와 난류(turbulent flow)의 두 가지 형태를 가질 수 있는데, 이 사실도 레이놀즈(Reynolds, 1842-1912)에 의해 1883년에야 알려졌다(그림 6 참조), 그전에는 실험적인 연구의 결과를 일관되게 해석하기 힘든 경우가 많았다.



<그림 6 레이놀즈(1883)의 층류와 난류에 대한 실험>

범선(sailing ship)과 달리 기선(steamship)은 짓기 전에 저항을 예측하고 적절한 증기기관과 추진기(propulsor)를 선정해야 하였으므로, 당시 막강 해군을 자랑하던 영국으로서는 저항 예측이 시급히 해결해야 할 과제였다. 먼저 추진기로 외륜과 프로펠러 중 어떤 것을 사용할 것인가 하는 문제는 1845년 수행된 HMS Rattler(프로펠러 추진)와 HMS Alecto(외륜 추진)의 줄다리기 시험 결과 승리를 거둔 프로펠러 쪽으로 결정되었다. 정확하게는 나사 프로펠러(screw propeller)라고 불리는 프로펠러는 아르키메데스의 나사 펌프(screw pump)에 그 연원을 두고 있으며, 원운동과 직선 운동의 결합인 나선 운동(helical motion)을 이용하여 추진력을 얻는 장치이다.

이와 같은 변혁의 시기, 1868년 프루드(William Froude, 1810-1879)는 배의 저항을 모형시험에 의해 예측하는 방법을 영국 해군에 제안하고 있었다. 다수의 저명한 조선공학자가 실선시험에 의해 저항을 예측해야 한다고 주장하고 있었고, 아직 역학적 상사성에 대한 개념도 정립되어 있지 않은 시점이었으므로, 그의 제안에 대해 많은 반론이 제기되었다. 논란의 초점은 모형선을 어떤 속도에서 시험하고, 그때 예측된 저항으로부터 어떻게 실선의 저항을 얻을 것인지에 대한 것이었다. 배는 물과 공기의 접촉면에서 움직이므로 배가 움직일 때 파도가 만들어지는데 이 파도를 만들어내는데 필요한 에너지는 배가 물에 공급해야 하며 이 때문에 배가 받는 저항을 조파저항이라고 한다. 한편, 물의 점성에 기인하여 배의 표면에 작용하는 마찰력이 있으며 이 때문에 배가 받는 저항을 마찰저항(R_f)

이라고 한다. 이 두 저항은 배가 받는 저항의 주요한 성분인데, 당시의 배들은 속도가 그리 크지 않았으므로 마찰저항이 조파저항보다 훨씬 클 것임을 프루드는 지적하였고, 배가 받는 마찰저항은 배와 길이와 표면적이 같은 평판(flat plate)의 마찰저항(R_{fp})과 같다는 가정을 도입하였다. 물론 평판의 마찰저항은 실험으로부터 얻어져야 했으며, 그는 전체 저항(R_T)에서 이 마찰저항을 빼고 남은 부분을 잉여저항(residuary resistance, $R_R = R_T - R_f$)이라고 불렀는데, 당연히 잉여저항의 상당 부분은 조파저항으로 볼 수 있다.

영국 해군은 1870년 결국 프루드의 제안을 받아들였으며, 해군의 지원으로 토르키(Torquay)에 최초의 예인수조(towing tank)가 1872년 3월 준공되었다. 같은 해 8월 해군에 최초의 보고서가 제출되었는데, 1874년 발표된 논문에서 프루드는 다음과 같이 모형시험과 관련하여 실선의 잉여저항 산정 방법에 관해 설명하였다.

‘law of comparison,’ which may be thus stated: If the ship be D times the ‘dimension’(as it is termed) of the model, and if at the speeds V_1, V_2, V_3, \dots , the measured resistances of the model are R_1, R_2, R_3, \dots , then for speeds, $\sqrt{D}V_1, \sqrt{D}V_2, \sqrt{D}V_3, \dots$ of the ship, the resistances will be $D^3R_1, D^3R_2, D^3R_3, \dots$. To the speeds of model and ship this related it is convenient to apply the term ‘corresponding speeds.’

‘비교법칙’은, 따라서 다음과 같다고 할 수 있다: 만약 실선의 크기(dimension, 용어가 이렇다)가 모형선의 D 배이고, 또 속도 V_1, V_2, V_3, \dots 에서 계측된 모형선의 저항이 R_1, R_2, R_3, \dots 라면, 실선의 속도 $\sqrt{D}V_1, \sqrt{D}V_2, \sqrt{D}V_3, \dots$ 에서 실선의 저항은 $D^3R_1, D^3R_2, D^3R_3, \dots$ 일 것이다. 이렇게 연관된 모형선과 실선의 속도들에 대해 ‘대응속도’라는 용어를 사용하는 것이 편리하다. (이승준 역)

나중에 차원해석에 의해 밝혀진 바에 따르면³¹⁾, 전체저항계수 C_T 는 일반적으로 프루드수 F_n 와 레이놀즈수 R_n 의 함수, 즉 $C_T(F_n, R_n)$ 인데, 프루드가 저항 성분을 마찰저항과 잉여저항으로 구분한 $C_T(F_n, R_n) \approx C_F(R_n) + C_R(F_n)$ 것은 의 근사를 도입한 것이며, 그의 비교법칙은 바로 모형선과 실선의 F_n 가 같을 때, 잉여저항계수 C_R 은 하나의 값을 가진다는 것과 같은 내용임을 알 수 있다. 나아가 배의 마찰저항이 배의 길이와 표면적이 같은 평판의 마찰저항과 근사적으로 같다고 가정한 것은 $C_F(R_n) \approx C_{FF}(R_n)$ 에 해당하므로, 프루드는 아직 층류와 난류의 구분에 대해 알고 있지 않았지만, R_n 를 같게 해주어야 하는 점의 물리적 중요성에 대해 충분히 인식하고 있었음을 알 수 있다. 또한 모형시험에서 모형선과 실선의 F_n 를 같게 하기 위해서는 $U \propto \sqrt{L}$, R_n 를 같게 하기 위해서는 $U \propto L^{-1}$ 이어야 하므로, F_n 와 R_n 를 동시에 같도록 시험하는 것은 현실적으로 불가능하다. 더구나 모형선은 실선보다 작은 것이 보통이어서 R_n 를 같게 하기 위해서는 모형선의 속도가 매우 커져야 하므로 현실적으로 불가능하다고 할 수 있어, 실제로 가능성이 있는 것은 프루드가 택한 방법뿐이다.

아르키메데스는 중력과 압력의 존재를 알지 못하면서도 부력의 원리를 밝혔으며, 프루드는 차원해석, 조파저항과 마찰저항의 기전, 층류와 난류의 존재 등을 알지 못한 가운데, 모형시험을 통해 실선의 저항을 예측하는 방법을 정립하였다. 무차원수를 사용하여 역학적 상사성에 관해 고찰하는 차원해석이 1914년 버킹엄(Buckingham, 1867-1940)의 파이 정리(π theorem)에 의해 일단락된 것으로 간주한다면, 프루드는 최소 40 년을 앞서 그 결과를 당겨쓰고 있었다. 한편, 배의 형상이 마찰저항에 미치는 영향이 크지 않다는 그의 가정이 꽤 좋은 결과를 주고 있었으므로, 점성에 기인하는 마찰저항에 관한 연구는 차후 평판을 중심으로 이루어지게 되었으며, 프란틀(Prandtl, 1875-1953)의 1904년 경계층(boundary layer)의 개념을 이용한 평판의 마찰저항 계산은 그 연장선상에서 이루어진 것으로 볼 수 있다.

배의 추진기로 낙착되어 기선 시대에 없어서는 안 될 도구가 된 프로펠러는 19세기 말 공기 중을 날 수 있는 기계, 즉 비행기의 추진에도 사용되기 시작하였다. 또한 비행기의 무게와 균형을 이룰 양력(lift)을 발생해야 하는 날개(wing)의 형상 설계를 위해 날개단면(airfoil)³²⁾에 관한 연구가 풍동(wind tunnel)을 이용하여 이루어지기 시작하였다. 1903년 라이트 형제(Wright brothers; Wilbur 1867-1912, Orville, 1871-1948)는 비행기를 날리는 데 성공하였는데, 이때까지만 해도 날개단면의 양력 발생에 관한 이론적 연구는 비행기 제작자들에게 뚜렷한 영향을 끼치지 못하였다. 단 1902년 쿠타(Kutta, 1867-1944)는 날개단면 주위의 유동을 포텐셜 유동으로 다루면서도 단면의 뒤끝(trailing edge)에서 유동이 단면으로부터 유연하게 떨어져 나간다는 쿠타 조건(Kutta condition)을 도입하여 단면 주위에 발생한 순환과 단면이 받는 양력을 계산할 수 있었다. 또한 1905년 주코스키(Joukowski, 1847-1921)는 날개단면 주위에 세기 Γ 의 순환(circulation)이 발생할 때, 단면은 $\rho U \Gamma$ 의 양력을 받는 것을 밝혔다. 물론 이와 같은 지식은 이번에는 거꾸로 배에 사용되는 프로펠러의 설계에도 이용될 수 있었다.

유체역학은 ‘유체의 운동에 대한 과학’이라고 하였는데, 유체 중에서 움직이는 물체, 또는 움직이는 유체 중에 정지해 있는 물체에 작용하는 힘을 예측하는 것은 유체역학이 역학이 될 수 있기 위해 우선하여 만족해야 하는 조건이라고 할 수 있다. 1902년 쿠타의 쿠타 조건을 이용한 날개단면에 작용하는 양력의 계산, 1904년 프란틀의 경계층 이론을 이용한 평판에 작용하는 마찰저항의 계산 등이 가능해지면서 그와 같은 조건을 만족하였다고 볼 수 있으며, 대체로 1904년을 기점으로 유체역학이 정립된 것으로 볼 수 있다.

19세기 후반에 이루어진 프루드의 모형시험을 이용한 실선 저항 추정과 관한 업적은 뒤집어 보면 유체 중에서 운동하는 물체에 작용하는 저항 또는 항력(drag)을 얻을 수 있게 하였고, 한편, 기선에 장착되어 배의 추진에 사용되던 프로펠러가 비행기에도 사용되면서 날개단면 주위에 발생하는 순환과 단면이 받는 양력도 얻을 수 있게 하였다. 직접적으로는 쿠타와 주코스키, 그리고 프란틀에 의해 20세기 초 유체 중에 놓인 물체에 작용하는 가장 기본적인 두 힘, 즉 양력과 항력을 예측할 수 있게 되면서 유체역학은 그 뿌리를 온전히 내리게 되었지만, 그 뒤에는 프루드의 수십 년을 뛰어넘는 선구적인 업적이 있었다. 배의 저항과 추진을 위해 축적된 지식이 결국 유체역학의 정립을 가져왔는데, 만약 오늘날 대학의 조선 관련 학과에서 무엇보다도 배의 저항 추진과 관련된 작업을 합리적으로 수행할 수 있게 하는 유체역학의 기본적 지식이 제대로 다루어지지 않는다면 조선공학도는 아마도 조선이 아니었으면 탄생하기 힘들었던, 아니면 최소한 그 탄생이 수십 년은 늦어졌을 과학을 배울 기회를 잃는 것이라고 할 수 있다.

6. 맺음말

이상으로 전통적으로 조선 관련 학과에서 배워오던 4대 역학, 즉 재료역학, 동역학, 열역학, 유체역학을 배와 관련하여 알아보았다. 어떤 역학도 그 발전 과정에서 배와의 관련성이 적다고 볼 수 없는데, 이하에서는 역학과 관련된 수학, 즉 공학수학(engineering mathematics)의 사용과 공학수학이 차지하는 범위의 확장에 대해 총체적으로 살펴보며 이 글을 맺기로 한다.

재료역학 분야에서 보 이론을 발전시켜 나감에 있어 과학자들이 가장 먼저 이해해야 했던 것 중의 하나는 곡률(curvature) 또는 곡률반경(radius of curvature, r)을 미분을 이용하여 정량적으로 표현하는 것이었다. 오일러는 1727년 보의 굽힘과 관련하여 임의의 단면에 굽힘모멘트(M)가 작용할 때, $r^{-1} = M/EI$ 임을 얻었는데, 여기서 E 는 탄성계수이고 I 는 단면의 2차 모멘트이다. r 를 정의하는 데도 적분이 필수라는 점을 지적하고자 한다. 위 식은 결국 미분방정식이 되어 미분방정식을 풀어서 그 해를 얻는 것이 더 이상 수학자의 전유물이 아니게 되었다.

미적분과 관련하여 아쉽게 생각하는 것은 미적분이 differential and integral calculus의 번역어인데, calculus에 해당하는 부분이 번역어에 전혀 보이지 않는다는 것이다. 뉴턴과 라이프니츠 이전에도 곡선의 기울기나 곡선 아래의 면적을 기하학적으로 구하는 방법이 존재하였고, 더구나 아르키메데스가 원의 면적, 또는 π 의 크기를 얻은 것은 기원전 3세기였다. 위에서 calculus는 계산을 뜻하며, 뉴턴

과 라이프니츠에 의해 곡선의 기울기나 곡선 아래의 면적을 더 이상 기하학적으로 구하는 것이 아니라 계산, 즉 x^n 의 미분은 nx^{n-1} 과 같은 관계를 이용하여 구할 수 있는 것을 강조하여 붙인 이름이다. 같은 관점에서 advanced calculus의 calculus는 미적분을 뜻하므로 약간 수준이 높은 미적분 '계산', 예를 들면 벡터 미적분 등을 포함하는 미적분을 뜻한다고 볼 수 있다.

동역학과 관련하여서는, 뉴턴의 제2 운동 법칙을 $L = mx$ 로 쓰기로 하면, 이 자체가 적분이 가능한 간단한 형태가 아닌 경우에는 벡터 미분방정식이 되어 $x(t)$ 를 구해야 하는 문제가 된다. 다시 한번 적분이나 미분방정식의 해를 구하는 것이 역학자들이 물체의 운동을 이해하기 위해 반드시 통과해야 하는 관문임을 알 수 있다. 강체의 회전운동을 다룰 때는 물체의 관성을 나타내는 관성모멘트 텐서를 먼저 구해야 하는데, 예를 들어 대칭(symmetric) 텐서의 성격은 순전히 수학적으로 결정되므로 텐서 관련 이론이 순전히 수학적 흥미를 만족시키기 위함이 아닌 것을 알 수 있다.

열역학에서도 상태 변수(state variable)의 존재를 결정하는 조건은 순전히 수학적, 특히 미적분을 사용하여 주어지며, 푸리에(Fourier, 1768-1830)는 전도에 의한 열전달을 다루면서 편미분방정식인 열전도 방정식을 삼각급수(trigonometric series)를 이용하여 풀었다. 그가 제안한 편미분방정식을 푸는 방법, 즉 변수분리와 직교 함수를 쓰는 급수 전개를 활용하는 방법은 차후 선형 편미분방정식을 푸는 방법의 효시가 되었으며, 푸리에 급수와 푸리에 적분은 물리계 전반에 걸쳐 사용되었다. 특히 푸리에 변환은 20세기 후반 컴퓨터의 활용과 더불어 그 적용 범위가 크게 확장되었다.

유체역학에서는 먼저 수정역학의 대부분 문제가 적분의 사용을 요구한다. 나아가 그나마 가장 간단하다고 하는 포텐셜 유동에 대한 지배 방정식이 편미분방정식이며, 유체 입자의 속도(u)가 속도 포텐셜(velocity potential, ϕ)의 그래디언트(gradient), 즉

$u = \nabla \phi$ 로 주어지므로, 속도 분포를 알기 위해서는 벡터 미분에 대한 이해가 선행되어야 한다. 점성 유체에 대해서는 유동장 내부의 응력 분포가 텐서로 주어지며, 유동을 기술하는 운동 방정식인 NS 방정식이 벡터 편미분방정식이다. 위에서 살펴본 바에 따르면, 나중에 정립된 역학일수록 관련된 수학의 범위가 넓어지고 학생으로서는 배우기 쉽지 않은 내용이 포함되어 있을 수 있다. 각 역학 과목에서 관련된 수학을 따로 가르치기 보다는 다양한 역학에서 나오는 공통적인 수학을 모아서 가르치면 보다 효과적이지 않을까 하는 생각에서 만들어진 분야 또는 과목이 공학수학이라고 할 수 있다. 조선 관련 학과의 학생이 배워야 하는 공학수학은 다시 말하면 역학 과목을 배우기 위한 선행 과목이고, 역학은 선박의 설계와 생산을 위해 없어서는 안 되는 지식임이 이 글에 의해 더욱 확실해졌기를 기대하며 이 글을 마감하고자 한다.

주석

- 13) 이승준, '조선공학의 시발', 대한조선학회지, 56권 1호 칼럼(7), 2019년 3월.
- 14) 이승준, 'Thermodynamics의 기원', 대한조선학회지, 57권 1호 칼럼(11), 2020년 3월.
- 15) D, S, L, Cardwell, <From Watt to Clausius: the rise of thermodynamics in the early industrial age>, Cornell University Press, 1971. Iowa State University Press에서 1989년 reprint로 다시 출판되었다.
- 16) 당시에는 열(heat)을 아직 불(fire)이라고 부르고 있었다.
- 17) 뉴욕시 부근의 허드슨강을 그때는 North River라고 부르고 있었다.
- 18) 효율(efficiency)은 일반적으로 출력/입력으로 정의되는데, 열기관의 경우에는 (기관으로부터 얻은 일)/(기관에 가한 열)로 정의할 수 있다. 단 위의 식이 성립하기 위해서는 먼저 열과 일의 등가성이 확립되어야 하는 점에 주의하기를 바란다.
- 19) 역학적 에너지라고도 부르지만 여기서는 당시의 의미를 살려 기계적 에너지로 부르기로 한다.
- 20) 중력장 또는 전자장 내에서의 위치에 따른 에너지 변화를 논의할 때는 potential을 위치로 번역하는 것이 타당한 것으로 보이나, 열역학, 유체역학, 화학 등의 더욱 일반적인 관점에서 보면 그와 같은 번역은 적절하지 않은 것으로 보인다.
- 21) 오늘날은 주로 작동유체 (working fluid)라는 용어를 사용한다.
- 22) 압력(p)과 체적(V)을 나타내는 직교하는 두 축에 의해 만들어진 평면 위에 생각하는 계의 변화 과정을 표시한 것으로, 사이클에 대응하는 도형 내부의 면적은 그 계가 한 일에 상응한다.
- 23) S. Carnot, <Reflections on the motive power of heat>, R. H. Thurston의 영역, John Wiley & Sons, 1890.
- 24) 기관이 방출하는 열을 양으로 취하면 클라우지우스 부등식은 $\oint \frac{dQ}{T} \geq 0$ 이 된다.
- 25) $\oint \frac{dQ}{T}$ 와 같은 폐경로(closed contour) 적분이 주어인 영역 내의 임의의 폐경로에 대해 영의 값을 가지면, 그 영역 내의 점 1과 2를 잇는 경로(path)에 대한 적분 $\int_1^2 \frac{dQ}{T}$ 는 경로에 무관하며 점 1과 2에 의해서만 결정되는 값을 가져야 하므로, 다음을 만족하는 함수 S 가 존재한다. $\int_1^2 \frac{dQ}{T} = \int_1^2 dS$
- 26) 이승준, <역사로 배우는 유체역학> 2판, GS인터비전, 2009.
- 27) 이승준, 'Fluid mechanics의 기원', 대한조선학회지, 57권 2호 칼럼(12), 2020년 6월.
- 28) 아르키메데스의 저술에 대한 번역본은 Heath(1897)가 대표적인데, 그는 아르키메데스 당시에는 없었던 근대적인 표현을 많이 사용하고 있어 여기서는 Dugas(1955)에 인용된 Peyrard(1807)의 번역본을 사용하기로 한다: R, Dugas, <A history of mechanics>, Editions du Griffon, Neuchatel, Switzerland, 1955. Dover Publications에서 1988년 다시 출판하였다.
- 29) 토리첼리는 갈릴레오와 그의 마지막 석 달 동안 기거를 같이하였으며, 그의 사후에 피사대학의 수학 교수직을 계승하였다.
- 30) 아르키메데스는 right segment of paraboloid of revolution이라고 표현하고 있지만, 논의 내용은 2차원 물체에 대한 것이므로, 포물기둥이라고 봐야 하며, Dugas(1955)도 같은 견해를 밝히고 있다.
- 31) 물의 밀도를 ρ , 운동학적 점성계수(kinematic viscosity)를 ν , 배의 속도를 U , 길이를 L , 침수표면적을 S , 정체압(stagnation pressure)을 $p_s = \rho U^2/2$ 라고 할 때, 전체저항계수(C_T), 마찰저항계수(C_F), 평판의 마찰저항계수(C_{FF}), 잉여저항계수(C_R)는 해당 저항을 $\rho_s S$ 로 나누어 얻고, 프루드수 $Fn = U/\sqrt{gL}$, 레이놀즈수 $Rn = UL/\nu$ 로 각각 정의하기로 한다.
- 32) 혼동의 우려가 없을 때 단면이라고 줄여서 부르기로 한다.