講 座

재료역학과 고체역학 :

유체역학자의 관점에서

이 승 준
〈충남대학교 교수〉

요 약

대략 17세기말－19세기초에 있었던 연속체 역학의 기본방정식이 이루어 지는 과정을 살펴보고, 특히 재료역학의 발전이 이 과정에서 어떤 역할을 하였는지에 대해 조감하였다. 또한 이와 같은 역사가 오늘날 우리 주변에 어떻게 투영되어 있는가를 살펴보고, 고체역학과 유체역학을 대비하여 앞으로의 발전 방향에 대해 생각해 보았다.

1. 서론

학부과정에서 고체역학(2학년)과 재료역학(3학년)을 수강한뒤부터 항상 가지고 있던 의문이 있었다. 고체역학(solid mechanics)과 재료역학(strength of materials)이 다른점이 무엇이길래 따로 배워야 하나? 일견 어리석게 들릴 수도 있는 질문이라 누구에게 물어볼수도 없고 해서 항상 궁금하게 여기던 의문이 되어 버렸다. 대학원에 진학하여 유체역학을 전공하면서 또 하나의 의문이 생겼다. 도대체 유체역학에서는 기본방정식(Navier-Storkes 방정식)의 유도에 왜 그렇게 많은 노력과 시간을 소모해야 하는지? 그 당시 조선공학과(1970년대) 대학원에서는 거의 대부분이 이상유체에 대한 연구만을 하고 있었으므로 한번 유도한 뒤에는 사실상 대학원 과정중에 Navier-Stokes방정식을 한번도 사용한 적이 없었기 때문에 이러한 의문도 그렇게 무시할만한 성질의 것은 아니었다. 이후 유학과정에서 첫번째 의문에 대한 답은 매우 자연스럽게 얻어졌다. 그러나 교수가 되어 유체역학을 강의 하면서 두번째 의문은 오히려 또 다른 의문을 야기하게끔 되었다. 이제는 상당수의 학생들이 대학원 과정중에 점성유체에 대한 연구를 하고 있으므로 기본방정식의 가용성에 대한 의문보다는 왜 그렇게 많은 기본개념들이 기본방정식의 유도에 필요한가에 대한 의문을 많이 가지고 있는 것을 알게되었다. 또한, 충남대학교의 경우 대학원 전공이 유체와 구조로 분리 되어 있는데, 많은 학생들이 유체전공을 기피하는 이유는 취직상의 문제를 차치하고도 유체쪽이 공부하기에 더 어렵다고 생각하는 때문이고, 또 상당히 많은 조선공학 분야의 연구인들도 비슷한 인식을 가지고 있는것을 알게되면서, 왜 그렇게 되었나 하는 의문이 생긴 것이다. 현실적으로 유체역학에서는 많은 새로운 개념과 학부과정에서 잘 다루지 않는 편미분방정식을 사용하여 기본방정식을 유도하고 이들 편미분 방정식의 해를 구할수 있어야만 기본지식들을 정량적으로 이해할수 있다. 이에 반해, 재료역학(고체역학이 아닌) 혹은 진동공학에서는 학부과정에서 배우는 상미분방정식만 알아도 기본지식의 정량적 이해에 별 어려움을 받지 않는다. 따라서 유체역학을

공부하기 위해서는 상대적으로 더 많은 수학지식이 필요하며 이점이 많은 사람들에게 큰 부담이 되고 있고, 또 유체역학이 상대적으로 더 어렵다고 하는 인식을 가지게 만들고 있다. 그러나 기실 연속체역학의 입장에서 보면 유체역학이나 고체역학은 서로 다른 물질을 다룰 뿐, 동일한 기초에 근거하고 있으므로 요구되는 수학지식의 양이 서로 다르다는 것은 언듯 납득하기 힘든다. 여기서 상기한 첫번째와 두번째 의문이 서로 깊은 관계가 있지 않을까 하는데 생각이 미쳤다. 즉 재료역학과 유체(혹은 고체)역학의 차이를 마치 구조와 유체의 차이로 받아 들이고 있는것 아닌가 하는 생각을 하게 되었으며, 이러한 점을 확인하기 위해 주위의 사람들에게 몇번 질문을 한 결과, 의외로 많은 사람들이 재료역학과 고체역학을 구분하고 있지 않다는 것을 알게 되었다.

개체발생은 계통발생을 되풀이 한다는 명제에 대해서는 항상 대단한 발견으로 생각하고 있다. 지식의 발달에 관해 이 명제를 적용하면, 한 개인의 지적성장은 인류가 지난날 밟아온 과정을 통하여 이루어 지는 것이 보통이라는 것인데, 어렸을 때 배운것일수록 과거에 알려진 것이며, 대학원과정에서는 최근의 연구결과들로부터 주로 배우게 되는 현실을 생각해보면 그렇게 틀린 이야기는 아님을 알수 있다. 따라서 유체역학과 재료 및 고체역학의 발전사를 상기의 의문에 유의하면서 다시 한번 돌이켜 보게 되었고, 그 결과 수긍이 가는 몇가지 사실들을 알게 되었다. 역학발전의 붕아기로 볼수있는 18, 19세기의 역학사가 현금에 어떻게 투영되어 있는가를 이해하는것이 문제의 관건이며, 이하에서는 이에 대해 보다 구체적으로는 논의하기 위해 2장에서는 Newton(1643-1727), Euler(1707-1783), Cauchy(1789-1857)에 의해 주도된 연속체역학의 기본개념들의 발전에 대해, 3장에서는 19세기 초까지의 재료역학의 발전에 대해, 4장에서는 재료역학과 고체역학의 상사성 및 상위성에 대해 각각 살펴보고, 우리나라의 유체역학과 고체역학의 발전방향에 대해 생각해 보기로 한다.

2장은 Truesdell(1968)의 'Essays in the history of mechanics'를, 3장은 Truesdell(1960)의 Euler의 총서(L. Euler Opera Omnia)중에서 'The rational mechanics of flexible or elastic bodies, 1638-1788'을 주로 참고하였고, Timoshenko(1878-1972, 1953)의 'History of strength of materials'와 Rouse(1957)의 'History of hydraulics'는 전반적으로 좋은 참고가 되었다. 또 본고에서는 열역학적인 논의는 제외하였다.

2. 17세기말-19세기초의 연속체역학의 발전

연속체는 대별하여 강체와 가변체(deformable body)로 분류할수 있고, 또 가변체는 고체와 유체로 구분할수 있다. 먼저 질점과 강체의 운동에 대한 근대역학의 발전에 대해 살펴보기로 한다. 근대역학의 시발점을 Newton의 Principia(1687)로 보는 데는 일반적으로 큰 반대가 없는 것 같다. 여기에는 여러가지 이유가 있을 수 있으나, 다음과 같은 점이 가장 중요한 것으로 생각된다. 즉 Prncipia 이전에도 물체운동에 관한 많은 연구들이 있었지만 대부분 개별적인 문제에 대한 단편적인 것이었으며, 모든 물체의 운동에 대해 적용가능한 일반적인 역학법칙을 일관된 공리체계로 만들고자 한 노력은 지극히 적었다는 점이다. 그러나 17세기 말에는 아직 질점(mass particle)의 개념이 확립되지 않았고, 병진운동과 회전운동의 구분이 확실치 않았으며, 질점계 및 연속체의 경우에는 어떠한 형태의 운동법칙이 적용되어야 하는지 명확하지 않았기 때문에 Principia 이후에도 상당한 시간이 지난 후에야 역학의 기본원리들이 확립되었다. 단적인 예로, 오늘날 우리가 흔히 Newton의 운동방정식으로 부르는 식

$$F_x=m\frac{d^2x}{dt^2},\ F_y=m\frac{d^2y}{dt^2},\ F_z=m\frac{d^2z}{dt^2}$$

단 m=질점 혹은 물체의 질량,

$\underline{F}=(F_x, F_y, F_z)$=외력의 합,

$\underline{x}=(x, y, z)$=위치벡터,

이 운동의 가장 기본적인 법칙으로 제시된 것은 Principia로 부터 무려 65년 이나 지난 후에 발표된 Euler(1752)의 'Discovery of a new principle of mechanics'라는 연구를 통해서이다. 논문제목이 시사하는 바와 같이 윗식은 발표 당시에 대단히 새로운 원리로서 받아들여 졌으며, Euler 자신

이 '역학의 제1원리(the first principles of mechanics)'로 명명했던 윗식은 세가지 관점에서 주목할 필요가 있다: 1. 세개의 미분방정식이라는 점이며, 2. 질점(mass particle) 혹은 질점계, 또는 연속체(continuous body 혹은 continuum)의 미소부분 혹은 전체에 대해 모두 적용시킬수 있는 식이라는 점이고, 3. 윗식을 사용하면, 외력이 알려진 계에 대해서는 운동하는 계도 동적평형(혹은 관성력)의 개념을 이용, 정정평형의 경우와 유사하게 다룰수 있다는 점이다. 각각에 대해 좀더 살펴보면;

1. 직교좌표계(Cartesian co-ordinates)의 사용은 Descartes(1596-1650, 1637)에 의해 시작되었으며, 17세기 말엽이면 정역학(statics)문제에서 힘을 좌표공간상에서의 벡터양으로 취급하는 것은 어느정도 일반화되어 있었으나, 동역학(dynamics)문제에서 속도, 가속도등의 운동에 관한 양들을 벡터양으로 취급한것은 Euler(1736)에 의해 처음으로 이루어 졌다. 또 최초로 직교좌표계를 사용하여 물체의 운동을 표현한것은 John Bernoulli(1667-1748, 1743)이지만, 일반적인 물체의 운동에 대해 직교좌표계를 위와같은 형태로 쓰기 시작한것은 Euler이다. 잘알려진 바와 같이 Newton은 Principia를 저술하면서 미적분의 개념을 최초로 사용하였으나, 미분방정식으로 운동을 기술하고자 하지 않았으며, Principia에서는 어느 곳에서도 위와 같이 일반적인 형태의 운동방정식을 찾을 수 없다.

2. Principia에 발표된 Newton의 운동법칙은 일반적인 '물체(body)'에 대해 적용되는 것으로 표현되어 있고, Newton의 예제는 두물체(two-body)의 운동을 다루는 것이 그 한계였으므로, 질점계 혹은 강체(rigid body)의 운동을 어떻게 다루어야 할지는 제대로 알려져 있지 않은 상황이었다. 질점과 연속체의 구분을 명확히 하고, 질점 혹은 강체의 질량중심의 병진운동에 관한 일반적인 운동법칙을 위와 같이 최초로 확립한 것은 Euler이다. Euler는 상기한 논문에서 윗식에 이어 강체의 회전운동에 관한 운동방정식인 Euler방정식을 유도하였으나, 내력에 관한 가설과 각운동량 원리의 독립성에 관한 문제 때문에 아직도 약간의 불확실한 점이 남아 있었다.

3. d'Alembert(1717-1783)의 원리로 알려져 있는 동적평형에 관한 개념은, 편미분방정식의 형태를 가진 운동방정식을 최초로 유도한 그의 '하중을 받고 있는 줄(weighted cord)'에 관한 연구(1743)에 기원하는 것으로 알려져 있으나, 일반적인 운동기술의 원리로서 받아들여 지게 된것은 윗식의 사용에 관한 Euler의 해석에 기인한다.

Euler에 의해 Newton의 운동방정식이 발표되고도 다시 23년이 걸려서야 근대역학의 기본적인 틀이 확립되었다. 즉 위의 2에서 밝힌 바와 같이 각운동량 원리의 독립성에 대한 문제를 명확하게 규명하여, Euler(1775)는 오늘날 선운동량과 각운동량원리로 알려져 있는 역학의 기본법칙, 즉 <u>모든 물체의 운동에 대해 항상 적용할수 있는 가장 일반적인 운동법칙</u>

$$\underline{F}=\frac{d\underline{M}}{dt},\ \underline{L}=\frac{d\underline{H}}{dt}$$

단 $\underline{F}$=작용하는 모든 힘의 합,

$\underline{M}$=선운동량,

$\underline{L}$=힘의 점 0에 대한 모멘트의 합,

$\underline{H}$=점0에 대한 각운동량,

0=공간상에 고정된 점,

을 발표하였다. 이러한 발견이 이루어 진 뒤에야 강체운동을 직접법(direct method 혹은 vector method)을 사용하여 기술하는 것은 일단 완료된 것으로 볼 수 있다.

강체와 가변체의 운동을 기술함에 있어 주요한 차이점은 두가지가 있다. 첫번째는 운동기술의 방법상, 매순간 위치를 달리하는 각 질점(혹은 미소요소)의 운동보다는, 가변체(특히 유체)의 경우 공간상에 고정되어 있는 기하학적 점을 매 순간 점유하는 질점(혹은 미소요소)의 운동에 주목할 필요가 있다는 점이다. 전자의 방법은 질점운동을 다룰 때의 Newton역학의 전형적인 방법(Lagrangian 혹은 정확하게는 Newtonian method)이고, 후자는 이상유체의 운동을 다루기 위해 Euler가 최초로 고안한 방법(Eulerian method)인데, 이러한 관점의 차이는 19세기에 물리학 전반에 걸쳐 유행할 입자이론(corpuscular theory)과 장이론(field theory)을 선행하는 것이어서 더욱 주목된다. 특히 Lagrange방법에서는 질점의 위치를 나타내는 위치벡터가 시간만의 함수로 주

어지는 원초변수(primitive variables)이나, Euler 방법에서는 속도벡터 자체가 공간, 시간의 함수로 주어지는 원초 변수라는 점은 Euler로 하여금 운동학(kineatics)과 운동역학(kinetics)을 확실히 구분하게 하였다. 두번째는 보다 근본적인 차이점으로 물체 내부에 발생하는 내력(internal forces)의 역할로 볼수 있다. 선운동량과 각운동량 원리를 운동에 관한 독립적인 기본법칙으로 간주할 경우, 강체운동을 기술하는 데는 내력이 물체운동에 미치는 영향은 전혀 없다. 그러나 이 원리들을 가변체(혹은 미소요소)에 적용할 경우에는 내력을 어떻게 정량화하고, 또 그 내력을 어떻게 운동(혹은 변위)과 관련시키느냐 하는 문제가 발생한다.

먼저 첫번째 운동기술에 관한 방법상의 문제는 Euler(1755)가 비점성유체에 대한 운동방정식(Euler의 운동방정식)을 유도하면서 해결된 것으로 볼 수 있으나, 두번째 내력에 관한 문제는 19세기에 들어가서야 일단락을 짓게된다. 내력은 질점 혹은 강체의 운동을 다루는 동역학에서 생각하는 외력과 같이 한 점에 집중적으로 작용하는 것이 아니라, 어떤 가상적인 면적에 작용하는 것으로 볼수 있으며, 따라서 내력을 정량적으로 다룰수 있기 위해서는 단위면적당의 힘 혹은 응력(stress)이라고 하는 새로운 개념이 필수적이다. 봉(bar), 보(beam)등의 굽힘(bending)이나 수정역학(hydrostatics)과 관련하여 장력(tension force) 또는 압축력(pressure 혹은 compression force)이 고려된적은 있으나, John Bernoulli (1743)의 저서인 Hydraulica 이전에는 내력이 가변체의 평형 혹은 운동을 기술하기 위하여 명시되어 사용된 적이 없다. 실제로 18세기 말까지 이루어졌던 재료역학분야의 업적의 상당부분은 탄성체의 변형에 관한 문제를 중립축과 같은 적절한 개념을 도입하여 1차원적인 따라서 내력으로서의 응력을 고려할 필요가 없는 문제로 바꾸어 다룬것에 기인한다고 해도 과언이 아니다. John Bernoulli는 Hydraulica에서 우리가 오늘날 Bernoulii 방정식이라고 부르는

$$\frac{p}{\rho}+\frac{u^2}{2}+gz=\text{일정},$$

단 p =압력,

ρ =밀도,

u =속도벡터의 크기,

g =중력가속도,

z =연직방향의 좌표,

식과 본질적으로 동일한 식을 최초로 유도하였다[통상적으로 윗식은 Daniel Bernoulli(1700－1782, John의 아들)의 Hydrodynamica(1738)에 기원하는 것으로 알려져 있고(여하한 경우에도 Bernoulli방정식임에는 변함이 없긴하다), 윗식을 비점성 유체의 정상, 비회전성 유동장에 대해 최초로 유도한 것은 Euler(1755)이다]. John Bernoulli에 의해서 p는 처음으로 내력의 밀도(internal force density)로서 인식되었으며, 이 개념은 그대로 Euler(1755)에 의해 수용, 더욱 일반화되어 비점성유체에 대한 Euler운동방정식

$$\rho\frac{d\underline{u}}{dt}=\rho\underline{b}-\nabla p,$$

단 $\underline{u}$=속도벡터,

$\underline{b}$=단위 질량당 외력,

이 유도되었다. 윗식에서의 p는 생각하는 모든 면에 대해 수직이고, 모든 방향으로 그 크기가 같은 내력의 등방향(isotropic) 성분으로 정의되어, 연속체의 운동(혹은 평형)방정식에 사용된 최초의 예이다. 내력의 일반적인 상태를 나타내기 위해서는 생각하는 면에 수직인 성분뿐만 아니라, 그면에 접하는 방향으로의 성분도 고려해야 하는데, 수직성분은 압력 p에 의해 쉽게 그 개념연장이 가능하나, 접평면성분은 보에 대한 Coulomb(1736－1806, 1773)의 연구에 의해 그 실마리가 제공되었다. Coulomb은 횡방향 하중을 받는 보의 한 단면에 수직으로 작용하는 압축응력과 인장응력의 합은 서로 같아야 한다는 결론을 얻었고, 또 하중과 각단면에서의 전단응력(shear stress)과의 관계를 구하였으며, 한점을 지나는 임의의 단면에 접하는 방향의 전단응력을 고려하여, 단순압축하의 보에서 45° 경사된 평면상에서의 전단응력이 최대임을 보였다. 위와 같이 응력텐서의 요소개념들이 John Bernoulli(1743), Euler(1755), Coulomb (1773)에 의해 하나하나씩 밝혀졌으나, 응력텐서를 제대로 정의하고 이를 사용하여 운동방정식을 유도하기 위해서는 또 다른 천재의 등장을 필요로 하였다. Cauchy(1823)는 한 점에서의 내력상태를

표시하기 위해서, 그점을 지나는 생각하는 면의 법선방향 단위벡터만 알면 내력벡터를 알 수 있는 어떤 양, 보다 정확하게 말하면 법선벡터를 응력벡터로 변환시켜주는 선형변환(linear transform), 즉 응력텐서를 정의하고, 단위질량당 외력 $\underline{b}$와, 응력텐서장(stress tensor field) $\underline{T}$에 상응하는 내력하의 연속체에 대한 운동방정식을 선운동량 원리에 따라

$$\rho\frac{d^2x}{dt^2}=\rho\underline{b}+\nabla\cdot\underline{T},$$

로 유도하고, 또 각운동량 원리를 적용하여

$$\underline{T}=\underline{T}^T,$$

단 상첨자 T는 전치를 나타냄,

즉 $\underline{T}$가 대칭텐서임을 증명하여, 소위 Cauchy의 제1, 제2운동법칙을 정립하였다. 운동 혹은 평형 방정식을 풀기 위해서는 $\underline{T}$를 원초변수와 어떻게 관련된 것으로 보느냐 하는 것이 우선적으로 해결해야 할 과제이다. 구성 방정식(constitutive equation)으로 부르는 $\underline{T}$와 원초변수의 관계식은 대상 물체의 재료적 성질에 따라 달라 지는데 여기서는 고체와 유체의 가장 간단한 경우인 균질등방성 선형탄성고체와 균질등방성 점성유체(Newton유체)에 대해 생각해 보기로 한다.

전자는 Hooke(1635－1703, 1675)의 스프링에 대한 실험적인 탄성법칙

$$F\propto\Delta l,$$

단 F ＝가해진 힘,

Δl＝길이의 변화량,

을 그 시발점으로 볼수 있다. Cauchy(1823)는 Hooke의 법칙을 일반화하여 응력－변형도 사이의 관계를 다음과 같이 제시함으로써, 선형탄성체에 관한 이론적 기초를 마련하였다.

$$\underline{T}=\lambda_E(\nabla\cdot\underline{d})\,\underline{I}+2\mu_E\,\underline{\varepsilon}$$

단 λ_E, μ_E＝탄성계수,

$\underline{d}$ ＝변위벡터,

$\underline{I}$ ＝단위텐서,

$\varepsilon=\frac{1}{2}\,[\nabla\underline{d}+(\nabla\underline{d})^T]$＝미소 변형도텐서,

윗식을 통상 Hooke-Cauchy법칙으로 부르며, 윗식의 $\lambda_E=\mu_E$인 특수한 경우에 대해서는 Navier(1785－1836, 1823)가 논의한 바 있다. 또 윗식을 운동방정식인 Cauchy의 제1법칙에 대입하여 $\underline{x}$를 $\underline{d}$로 대치하고, 미소변형의 가정에 의해

$$\frac{d^2\underline{d}}{dt^2}\simeq\frac{\partial^2\underline{d}}{\partial t^2}$$

을 사용하면,

$$\rho\frac{\partial^2\underline{d}}{dt^2}=\rho\underline{b}+(\lambda_E+\mu_E)\nabla(\nabla\cdot\underline{d})+\mu_E\nabla^w\underline{d},$$

를 얻는데, 이 식을 통상 Navier방정식이라고 부른다.

한편 후자는 Newton(1687)의 Principia에 기술되어 있는 점성법칙

$$F\propto\Delta u,$$

단 F ＝점성에 기인하는 힘,

Δu ＝연속한 층 사이의 상대속도,

을 그 시발점으로 볼 수 있다. Cauchy(1823)는 상기한 선형 탄성체에 대한 방법을 그대로 Newton 유체에도 적용하여 등방성 성분인 압력을 고려하지 못했고, Poisson(1781－1840, 1831)은 이점을 수정하여

$$\underline{T}=[-p+\lambda_v(\nabla\cdot\underline{u})]\underline{I}+2\mu_v\,\varepsilon,$$

단 λ_v, μ_v＝점성계수,

$\underline{u}$ ＝속도벡터,

$\varepsilon=\frac{1}{2}\,[\nabla\underline{u}+(\nabla\underline{u})^T]$＝변형도 시변율(strain rate) 텐서,

를 최초로 구하였다. 이 식을 통상 Newton-Cauchy-Poisson법칙으로 부르며, 여기서 μ_v가 일정이고, 또 비압축성 유체($\nabla\cdot\underline{u}=0$)인 경우에 대해서는 Navier(1821)에 의해, 또 $3\lambda_F+2\mu_F=0$인 특수한 경우에 대해서는 Saint-Venant(1797－1886, 1843)과 Stokes(1819－1903, 1845)에 의해 각각 논의된 바 있다. 위의 구성 방정식을 Cauchy의 제1법칙에 대입하고

$$\frac{d^2\underline{x}}{dt^2}=\frac{d\underline{u}}{dt}$$

를 사용하면

$$\rho\frac{d\underline{u}}{dt}=\rho\underline{b}-\nabla p+(\lambda_v+\mu_v)\nabla(\nabla\cdot\underline{u})+\mu_v\nabla^2\underline{u},$$

를 얻는 데, 이 식을 통상 Navier-Stokes방정식이라고 부른다.

이상에서 연속체 역학의 기본방정식 및 그와 관련된 개념들의 발전에 대해 개략적으로 살펴 보았다. 각각의 개념들이 상당한 시간이 지난후에야

차례차례로 그 모습을 나타낸 Newton의 Principia(1967)로 부터 Cauchy(1823)에 이르기까지 136년의 역사를 돌이켜 보면, 매 단계마다 수십년의 연구를 필요로 했고, 또 그 기간 동안의 연구결과를 새로운 개념으로 추출해 냄으로써, 연속체 역학의 기본방정식이 이루어 지게 된것을 알 수 있다. 이런 관점에서 유체역학 혹은 고체역학을 다루는 대학원 1학년 과정은 대단히 많은 새로운 개념을 정확하게 전달해야 하는 과제를 지니고 있다고 보이며, 기본방정식의 유도에 왜 그렇게 많은 노력과 시간을 필요로 하는 지 이해할 수 있을 것으로 생각된다. 3장에서는 18 세기 말까지의 재료역학의 발전에 대해 살펴 보기로 한다.

3. 18세기 말까지의 재료역학의 발전

재료역학(정확하게는 재료강도학, strength of materials)을 구조재료 혹은 부재의 강도에 관한 학문으로 보면 그 역사는 인류의 역사와 더불어 발전해 온 것으로 볼 수 있다. 또 재료역학은 미적분학을 역학문제에 적용시킨 최초의 분야였으며, 그 결과 탄성곡선, 보이론, 좌굴이론, 진동론등의 결과를 이미 18세기에 상당부분 이룩하였다. 전장에서 살펴 본 바와 같이 17, 18세기에는 탄성체에 대한 일반적인 운동 혹은 평형방정식이 아직 알려져 있지 않은 상황이었으므로 처음에는 현(string), 줄(cord), 사슬(chain)등에서 시작하여, 띠(band), 보, 기둥(column), 박막(membrane), 판(plate), 각(shell)등에 한 연구로 발전해 가며 각각의 경우에 대한 해를 따로 구하는 작업이 이루어졌다. 역학의 발전에서 자주 볼수 있듯이 일반적인 원리가 먼저 형성되고, 그 결과를 개별적인 문제에 적용시켜 나가는 것이 아니라, 많은 개별적인 문제를 각각 다룬 후에야 점진적으로 일반적 원리에 도달하게 되는 전형적인 예를 재료역학과 탄성체이론의 초기 발달과정에서도 볼 수 있다.

강체에 관한 정역학 문제를 푸는 데 있어 힘과 모멘트의 평형을 고려해야 한다는 점은 16세기에는 이미 상당히 보편화된 지식이었고, 이는 Leonardo da Vinci(1452-1519)의 노트에서도 잘 나타나고 있다. 17세기에 들어와서야 여러명의 연구자들이 근대적인 의미에서 재료역학이라고 부를 수 있는 연구를 수행하기 시작하였다. 먼저 Beeckman(1570-1637, 1620)은 굽힘 상태에 있는 띠에 대해 논하면서 최초로 중립선(neutral line)의 개념을 도입하였으며, 1630년의 연구에서는 쇠줄(wire)의 신장과 파괴에 대해 논하면서 변형 자체보다도 변형도가 더욱 중요한 변수임을 지적하였다. 또 Galileo(1564-1642)는 그의 저서 Two New Sciences(1638)(새로운 과학은 동역학과 재료역학을 뜻한다)에서 굽힘 상태에 있는 외팔보의 파괴하중(breaking load)에 대해 논하면서, 중공(hollow) 형의 관(tube)이 중실(solid) 형보다, 같은 무게라면 훨씬 더 큰 강도를 가진다는 것을 입증하였고, 또 기하학적 상사성이 항상 역학적 상사성을 의미하지 않는다는 것을 최초로 설파하였다.

한편 Huygens(1629-1695, 1646)는 현수선(catenary)에 대한 연구에서, 무게가 없는 줄에 동일한 무게의 추를 동일한 수평간격으로 매달게 되면, 줄의 변형곡선은 포물선이 되는 것을 증명하였다. Pardies(1636-1673, 1673)는 마찬가지로 연속적인 줄의 현수선도 포물선임을 증명하면서 줄을 한 점에서 가상적으로 잘라서 생각하면 한쪽이 다른 쪽에 미치는 두 힘은 서로 크기는 같고 방향은 줄의 접선 방향이나 서로 반대인 것을 고려함으로써, 소위 내력에 관한 응력원리(stress principle)의 대단히 중요한 기본적 개념을 제안하였다. 2장에서 논의 한바와 같이 Hooke(1675)는 여러 종류의 스프링에 대한 실험을 거듭한 끝에 가해진 힘과 발생한 변형사이에 비례관계가 있음을 밝혀냈으며, 또 굽힘 상태에 있는 외팔보의 길이방향 올(fiber)이 오목한 쪽은 압축력을, 볼록한 쪽은 인장력을 받는다고 추론하였다. 한편 미적분학의 창시자 중의 한 사람인 Leibniz(1646-1716, 1684)는 굽힘 상태에 있는 보의 한 단면에는 오목한 쪽에서 부터 볼록한 쪽으로의거리에 비례하는 인장력이 작용한다는 가정하에

$M \propto I$,

단 M=굽힘 모멘트,

I=단면의 관성 모멘트

임을 보였다. 그는 또한 물체의 탄성적 성질과 음향학적 성질 사이에 밀접한 관계가 있다는 점을

지적하였다. 1690년에 Leibniz에 의해 제안된 균일한 현수선의 형태를 구하기 위한 공개 경쟁은 미적분학을 이해하고 사용할 수 있는 사람이 역학 문제의 해결에 훨씬 우월할 수 있다는 것을 단적으로 보여 주었다. Huygens, John Bernoulli, Leibniz가 해답을 제시하였는 바, 이들 중 Huygens는 과거시대의 방법인 일종의 극한법, Leibniz와 John Bernoulli은 미래시대의 방법인 미적분학을 사용하였는 데, 누가 보기에도 후자의 방법이 훨씬 간단 명료하였다. James Bernoulli (1655－1705, John의 형, 1691)는 탄성곡선(elastica)과 관련하여 띠의 변형에 대해 고찰하면서, 변형에 따른 곡률과 굽힘모멘트가 비례관계, 즉

$$\frac{B}{r}=M,$$

단 B=비례상수,

r =곡률반경,

임을 최초로 밝혀 내고, 탄성곡선에 대한 미분방정식을 유도하였다. 그는 1695－1705년 사이의 연구를 통해, Hooke의 법칙이 참이면 중립선의 위치가 중심선(central line)이어야 함을 알아 내었으나, 그의 실험결과가 Hooke의 법칙과 일치하지 않는다는 이유로 이를 받아 들이지 않았다. 또 그는 보와 관련하여 그 때까지의 연구들과는 달리 파괴하중이 아닌 보의 변형곡선에 대한 연구를 시작하였으며, 응력－변형도 관계식은 시편(specimen)의 성질이 아니고 재료의 고유성질임을 인지하고 있었다.

이상에서 간략하게 살펴 본 바와 같이 17세기에 이미 재료역학의 기본적 문제인 신장, 굽힘, 변형, 파괴에 대한 질문들이 형성되었으며, 이들 질문에 대한 답을 찾는 과정에서 17세기 말에 발명된 미적분학은 큰 도움을 주고 있음을 알 수 있다. Euler에 의해 선도된 18세기의 재료역학의 발전은 미적분학을 역학문제에 응용하는 과정에서 주로 일어났으며, 심지어 Euler는 미적분학을 위해 너무 많은 역학문제를 만들어 냈다는 비난까지 받을 정도였다.

18세기 초기에 매우 중요한 발견이 Parent (1666－1716, 1713)에 의해 이루어 지나, 그의 논문은 Académie des Sciences에 의해 거부당하는 등의 수모를 당하고 60년 후에 Coulomb에 의해 재발견되기 까지 전혀 주목받지 못하였다. 그는 굽힘 상태에 있는 보의 한 단면에는 인장력 뿐만 아니라 압축력도 작용하며, 각각의 합은 서로 같아야 하고, 인장과 압축시의 재료성질이 동일하다면, 즉 탄성법칙이 성립한다면, 중립축은 중심축에 있어야 함을 밝혔다. 또 하중과 힘의 평형을 이루기 위해서는 각 단면에 전단력이 작용해야 한다고 주장하여, 전단력의 개념을 최초로 도입하였다. Euler(1727년에 수행, 1766년에 발표)는 Hooke의 법칙을 수용하고, 각 단면에서의 길이방향 올의 변형이 선형적으로 일어 난다는 가정하에

$$\frac{EI}{r}=M,$$

단 E=신장계수

임을 밝힘으로써, Leibniz와 John Bernoulli의 결과를 통합, 발전시켰다. 윗식의 E는 오늘날 Young의 계수 혹은 탄성계수로 불리운다. 이어서 1728년에는 위의 연구결과를 더욱 일반화하여, 현수선과 탄성곡선에 대한 그때 까지의 연구 결과를 모두 포괄하는 변형곡선에 대한 미분방정식을 모멘트평형을 이용하여 유도하였다. 한편 Musschenbroek(1693－1761, 1729)는 실험에 의해 압축하에서의 파괴를 최초로 관찰하고 또 파괴발생 이전에 좌굴현상이 일어남을 발견하였다. 그는 실험에 의해

$$P_c \propto \frac{h^2b}{l^2}$$

단 (l, b, h)=보의(길이, 폭, 두께),

임을 제안하였다. Euler는 1743년 변분법에 관한 최초의 책을 출판하였는 데, 여기서 그는 탄성곡선을 예로 들었으며, 변형에너지에 비례하는 양인 $\int r^{-2}ds$을 최소화 하는 변분 원리로 부터 탄성곡선의 평형방정식을 유도하였다. 또 그는 좌굴에 대한 최초의 이론을 발표하여

$$P_c=\frac{\pi^2B}{l^2}$$

를 얻음으로써, Musschenbroek의 실험식을 뒷받침하였다. 이상한 것은 비례상수 B가 EI임을 이미 밝혔음에도 불구하고 $B \propto h^2b$를 주장한 점인데, 이 오류는 1776년에 가서야 수정되었다. 2장에서 밝힌 바와 같이 1752년 이전에는 아직 일반적으로

적용시킬 수 있는 운동 법칙이 알려져 있지 않았으므로 평형 혹은 운동방정식의 유도는 각각의 문제에 대해 개별적으로 이루어 졌다. 그러나 줄, 띠, 보 등에 대한 연구결과가 누적되면서 점차적으로 일반적인 법칙으로서의 운동법칙을 구하고자 하게 되었으며, Euler(1752)의 연구 이후에는 개개의 경우에 대한 평형방정식을 얻기 위해 각 문제의 특수성을 교묘하게 이용하는 등의 방법은 더 이상 필요하지 않게 되었다. 물론 오늘날의 입장에서 보면 지극히 당연한 일로 여겨 지나, 그 당시에는 혁명적인 변화였으며, 이 때부터는 지배방정식의 유도보다는 구해진 방정식을 어떻게 푸느냐 하는 것이 더욱 주요한 문제가 되었다.

Lagrange(1736-1813, 1769)는 Euler(1743)의 임계하중이 무수히 많은 임계하중의 첫번째 것임을 밝혔다. 또 Euler(1771)는 유연한 선(flexible line)으로 볼 수 있는 1차원 재료역학 문제의 일반화를 시도하여, 임의의 방향과 크기를 갖는 직선응력(line stress)의 개념을 도입하였다. 그는 평면 상에서의 힘과 모멘트의 평형을 고려하여,

$$\frac{dT}{ds}+V\frac{d\phi}{ds}=-F_t,$$

$$\frac{dV}{ds}-T\frac{d\phi}{ds}=-F_n,$$

$$\frac{dM}{ds}-V=0,$$

단 T =접선방향의 인장력,

V =법선 방향의 전단력,

F_t =하중의 접선방향 성분,

F_n =하중의 법선방향 성분,

ϕ =접선의 기울기각도,

을 얻었으며, 이식은 1차원 문제에 한정된 것이기는 하나 생각하는 물체의 구성방정식과 전혀 무관하게 성립하는 최초의 연속체에 대한 평형방정식이다. 이어서 Euler(1774)는

$$\underline{S}=T\underline{t}+V\underline{n},$$

단 $\underline{t}$ =접선방향의 단위벡터,

$\underline{n}$=법선방향의 단위벡터,

로 정의하고, 생각하는 선 위의 한 점에서 잘라 그 점의 양쪽을 +, -로 표시하면

$$\underline{S}_+ + \underline{S}_- = 0,$$

임을 주창하였다. 이로써 내력의 기본 개념인 응력원리는 일단 완성되었다고 할 수 있다. 그는 또 1776년에 Musschenbroek의 좌굴에 대한 실험결과를 이용하여 나무에 대해 $E=7.7\times10^5 lb/in^2$임을 보이고, 첫번째 좌굴하중을 받을 때의 변형도는 0.00069임을 보임으로써, 대변형과 대변형도 사이의 구분을 보다 확실하게 하였다.

지금까지 고찰한 바와 같이 18세기의 재료역학의 발전은 총체적으로 근대역학과 연속체역학의 기본원리들을 알아내는 데 귀중한 견인차 역할을 하였으며, 재료역학과 진동공학의 문제들은 미적분학을 역학문제에 적용시켜 유용한 결과를 얻어 내는 최초의 시험장을 제공하였다.

19세기 초기에 연속체의 기본적인 운동방정식이 알려지게 되었고, 또 이 방정식의 해결을 위해, 불란서를 중심으로 구성방정식의 형태에 관해 많은 논란이 있었다. 탄성계수가 하나인가, 둘인가, 혹은 점성계수가 하나인가, 둘인가 등에 관한 의문은 20세기에 들어 와서도 잠깐 계속되었으나, 일단은 선형탄성체와 점성유체 모두 두개의 독립적인 계수들을 가지는 것이 타당한 것으로 밝혀졌다. 연속체 역학의 기본 방정식이 완결되게 되자 재료역학에서 구한 해들의 정확성에 대한 문제가 야기 되었으며, 이들에 관해서는 4장에서 살펴 보기로 한다.

4. 재료역학과 고체역학

고체역학은 연속체역학의 한 분야로서 고체의 변형과 운동을 다루는 학문이라는 점에 대해서는 다른 의견이 별로 없는 듯 하다. 그러나 재료역학에 대해서는 사람마다 조금씩 다르게 생각하고 있으므로, 현존하는 재료역학 혹은 탄성론에 대한 책을 쓴 저자들의 생각을 살펴 보기로 한다. Den Hartog(1949)는 재료역학을 가변탄성체의 정역학으로 간주하였으며, 재료강도학이라는 이름은 19세기 초반의 불란서에서 사용하던 résistance de matériaux에서 유래한 것임을 밝히고 있다.또 그는 구조부재의 응력해석을 위해 굽힘, 비틀림 등의 단순화 가정을 도입하여 다루는 분야를 재료역학, 그렇지 않으면 탄성론으로 구분하여 재료역학과 탄성론의 차이는 근사의 정도에 있다고 생각하였다. Novozhilov(1961)는 재료역학은 엄밀해는 아니지만 실제적인 문제에 대해 간단한 형태의

공식들을 제공하여 충분히 안전한 구조설계를 할 수 있게 해주는 과학의 한 분야로 생각하였고, 또 Housner(1965)는 재료역학을 탄성론과 대조하여 실제적인 문제의 근사해를 구하는 응력해석의 한 분야로 생각하였으며, 재료강도학보다는 물체강도학 또는 응용응력해석이 더 적합한 명칭이라는 견해를 밝혔다. Timoshenko(1971)는 재료역학은 하중을 받는 고체의 거동을 취급하는 응용역학의 한 분야로 생각하였다(이글을 쓰면서 Timoshenko의 Strength of materials가 Timoshenko 사후 Mechanics of materials로 명칭이 변경된 것을 알게 되었다. 우리나라에서는 일찍부터 재료역학으로 부르고 있었으니 사실상 이점에서는 앞서 가고 있었다).

위와 같은 생각들을 정리해보면 재료'역학'은 구조부재에 관한 정역학적 문제를 실용적 근사이론을 사용하여 다루는 학문이라고 해도 크게 틀리지 않을 것으로 생각된다. 이에 대하여 고체역학은 연속체(구조부재 뿐만 아니라)를 대상으로 하고 정역학 및 동역학을 포함하는 학문이며, 탄성론은 그 중 가장 먼저 발달되고 또 가장 많이 알려진 고체역학의 일부분일 뿐이다. 2, 3장에서 살펴본 바와 같이 역사적인 이유로 재료역학은 개별적인 이론(ad-hoc theory)들의 집합이며, 고체역학은 일반적 이론을 그 근간으로 한다.

물론 고체역학의 가장 일반적인 형태의 평형방정식으로 부터 출발하여, 각각의 경우에 적합한 가정을 도입하여 현, 보, 판, 각이론 등을 얻을수 있다. 따라서 이들 개별적인 이론은 고체역학의 기본방정식들을 지니고 있는 적용한계 이외에도 각각의 근사에 따르는 추가적인 한계를 지니게 된다. 이와 관련하여 가장 주목할만한 결과중의 하나는 Saint-Venant(1855)의 원리가 아닌가 생각된다. 하중의 형태가 세밀하게는 다르다고 하더라도, 정적으로 등가인 하중계로 치환하여 풀면 최종 결과는 크게 틀리지 않는다는 소위 근사에 대한 원리인데, 엄밀하게 증명된 경우는 그다지 많지 않음에도 불구하고 오히려 경험칙으로서 받아들어져 모든 근사이론의 기저를 이루고 있다. 특히 Saint-Venant 원리에 따르면 재료역학적인 방법을 사용하여 하중이 작용하는 곳 부근에서의 해를 구했을 때, 그 해의 정확성은 가장 떨어진다는 점은 항상 유의해야 할것으로 생각된다.

근대적인 의미에서 유체역학(fluid mechnics)이 발흥한 것은 20세기초로 볼 수 있다. 직접적인 동기는 19세기 말에 시작된 항공역학의 발전과 Prandtl(1875−1953, 1905)의 경계층이론에 의해 유체 유동에 의해 물체가 받는 저항을 구하는 것이 가능하게 된 점이었다. 이상유체를 다루던 수동역학(hydrodynamics)에 의해서는 물체가 무한유체중에서 일정속도로 운동하는 가장 간단한 경우에 대해서도 물체가 받는 저항을 계산할 수 없었으며 [Euler(1745)의 결과(d'Alembert의 역설(1750)로 알려져 있음)], 또 Newton유체에 대한 가장 일반적인 운동방정식인 Navier-Stokes 방정식은 유도되었으나, 풀기가 대단히 어려워 이론적인 연구가 기여한 실제적인 업적은 거의 없었던 상황이었으며, 반면에 수력학(hydraulics)은 경험과 실험을 위주로 하여 실질적인 기여는 톡톡히 해 왔으나, 통일적인 원리를 결여하고 있었던 상태였다. Prandtl의 연구는 이들 두 분야에 종사하던 사람들에게 기폭제 역할을 하여 수동역학과 수력학이 통합되는 방향으로 변화하게 하였으며, 그 결과는 유체역학의 새로운 출현으로 나타났다.

유체역학과 고체역학을 대비하여 볼 때, 우선 생기는 의문은 유체역학에는 왜 고체역학의 재료역학과 같은 부분이 없는가 하는 점이다. 유체역학의 문제는 기본적으로 평형문제가 아니고 운동문제이며, 따라서 대류관성력(convective inertia force)에 기인하는 비선형성이 본질적인 난제이다. 그렇다고 하더라도 정상상태(steady state), 혹은 준정역학적(quasi-static)인 상태개념을 도입하여 시간과 무관한 문제로 근사할 수 있는 경우도 많이 있으며, 이런 경우에는 유선 혹은 유관의 개념을 사용하여 공간적으로 1차원 문제로 근사하는 것도 가능하다. 즉 비점성 유체의 비회전성 유동장인 경우에는 Euler방정식을 유선을 따라 적분하여 Bernoulli방정식(대수방정식)을 얻을 수 있으며, 대부분의 초기설계에서는 이러한 1차원적 근사법도 대단히 유효하다. 그러나 점성유체인 경우에는 몇몇 간단한 경우를 제외하고는 위와 같은 근사이론을 적용시키기 매우 어렵다는 문제점이 있다. 또 유체역학의 문제들은 구조물처럼 유한한 갯수의 단순화가 가능한 요소부재로 이루

어지는 것이 아니고 대부분이 유체기계, 혹은 유체를 포함하는 계에 관한 문제이며, 따라서 설계에 필요한 실용적인 자료들은, 실험에 의해 얻어지거나, Table, 혹은 Manual 등의 형태로 주어지는 것이 보통이다. Euler가 유체에 대해서는 비점성유체에 대한 운동방정식을 유도하였으나, 탄성체에 대해서는 1차원적인 문제를 제외하고는 일반적인 평형, 혹은 운동방정식을 유도하지 못하였던 이유는 단순화 가정에 의해 재료역학분야에서는 지속적인 연구성과들을 얻고 있었기 때문에 일반적인 운동방정식에 대한 요구가 그렇게 크지 않았으나, 유체역학에서는 기본방정식을 유도하지 않고서는 조금도 앞으로 나가기 힘들었기 때문이다.

그러나 1960년대 이후의 전산기의 빠른 발전은 복잡한 편미분방정식을 푼다는 것이 불가능한 일이 아닌 것으로 바꾸어 가고 있으며, 특히 급속히 발전하고 있는 계산유체동역학(CFD: computational fluid dynamics)은 일반적인 N-S풀개(Navier-Stokes solver) 및, 개별적인 문제에 대한 풀개의 개발속도를 대단히 촉진하고 있다.

고체역학의 경우, 1940년대까지는 거의 대부분이 탄성체의 미소변형에 대한 연구가 위주였으나, 그 이후에는 소성, 대변형, 열탄성, 열소성, 점탄성 등의 여러가지 이론 및 물질을 다루게 되었으며, 이러한 노력이 고체역학을 새롭게 태어나게 하였다. 1950년대 이후의 고체역학의 발전은 눈부신바 있으며, 재료역학을 고체역학의 실용가능성이 입증된 부분집합이라고 정의할수 있다면, 재료역학의 범위는 갈수록 확대될 것이 확실하다. 바로 이런 관점에서 고체역학 연구의 필요성이 절실히 요구된다고 하겠으며, 한편 10년에 1000배씩 빨라지고 대형화되는 컴퓨터의 발전은 유체역학에서의 '재료역학' 탄생을 예고하고 있다고 생각되며, 유체역학의 실용화를 보다 효율적으로 단시간 내에 이룩하기 위해서는 유체역학의 본질적 문제에 대한 유체역학자들의 보다 깊은 통찰이요구되고 있다고 생각된다.

참고문헌(연표)

서론에서 전반적으로 사용한 참고문헌을 밝혔으며, 이들 책에 더욱 자세한 참고문헌이 실려 있으므로 여기서는 본고에 등장한 사람들의 연표로서 참고문헌에 대신하고자 한다.

[1] Leonardo da Vinci; 1452-1519, Italy.
[2] Galileo Galilei; 1564-1642, Italy.
[3] Beeckman, Issac; 1570-1637, France.
[4] Descartes, René; 1596-1650, France.
[5] Huygens, Christiaan; 1629-1695, Holland.
[6] Hooke, Robert; 1635-1703, England.
[7] Pardies, Ignace Gaston; 1636-1673, France.
[8] Newton, Issac; 1643-1727, Englang.
[9] Leibniz, Gottfried Wilhelm; 1646-1716, Germany
[10] Bernoulli, James; 1655-1705, Switzerland.
[11] Parent, Antoine; 1666-1716, France.
[12] Bernoulli, John; 1667-1748, Switzerland.
[13] Musschenbroek, Pieter Van; 1693-1761, Holland.
[14] Bernoulli, Daniel; 1700-1782, Switzerland.
[15] Euler, Leonhard; 1707-1783, Switzerland, Germany, Russia.
[16] D'Alembert, Jean Le Rond; 1717-1783, France.
[17] Coulomb, Charles Augustin; 1736-1806, France.
[18] Lagrange, Joseph-Louis; 1736-1813, Italy, Germany, France.
[19] Poisson, Simeon-Denis; 1781-1840, France.
[20] Navier, Claude-Louis-Marie-Henri; 1785-1836, France.
[21] Cauchy, Augustin-Louis; 1789-1857, France.
[22] Saint-Venant, Adhêmar-Jean-Claude Barré De; 1797-1886, France.
[23] Stokes, George Gabriel; 1819-1903, England.
[24] Prandtl, Ludwig; 1875-1953, Germany
[25] Timoshenko, Stephan P.; 1878-1972, Russia, U.S.A.