



특별기고



배와 역학 (1/2)

글 : 충남대학교 이승준 명예교수 / sjoonlee3204@gmail.com

본 기고문은 학회 미래기술연구소 보고서 2023-002호를 전재한 글입니다. SNAKZINE 두 호에 걸쳐 연재됩니다.

1. 들어가기

선박 또는 배는 물에 떠서 움직이는 물체, 즉 부유체로 승객과 화물을 위한 공간을 제공하는 안전한 구조물이라고 정의할 수 있다. 이 정의는 배가 역학(mechanics)과 관련하여 만족해야 하는 성질로 적어도 세 가지를 내포하고 있다. 첫째는 물에 떠 있어야 할 것, 둘째는 우리가 의도하는 대로 움직일 수 있을 것, 셋째는 구조적으로 안전해야 할 것이다. 물론 잠수함과 같은 수중에서 움직이는 배도 있지만 이 글에서는 주로 수상선, 즉 물 위에 떠서 다니는 배에 관해 생각하기로 한다.

첫째 성질을 역학적으로 생각하면 배는 어떠한 상황에서도 배의 무게와 같은 충분한 크기의 부력을 받을 수 있어야 한다. 여기서 부력(buoyancy)은 아르키메데스(Archimedes, BC287-212)에 의해 기원전 3세기에 알려진 개념이지만, 아르키메데스 원리를 적용하여 배에 작용하는 부력을 계산할 수 있으려면 배의 부피 또는 체적을 계산할 수 있어야 한다. 아르키메데스의 시대에 3차원 형상의 체적을 구하는 것은 직육면체, 구와 같은 특수한 경우에만 가능했으며, 일반적인 형상을 가지는 배와 같은 물체의 부피를 구하는 것은 17세기 후반 뉴턴(Newton, 1642-1727)과 라이프니츠(Leibniz, 1646-1716)에 의해 적분(integral calculus)이 알려진 이후에야 통상적인 일이 되었다. 둘째 성질, 즉 배를 우리가 의도하는 대로 움직일 수 있게 하는 것 중, 가장 기본적인 것은 배를 일정한 속도로 달릴 수 있게 하는 것이다. 17세기 후반에 발표된 뉴턴의 운동 법칙(laws of motion)에 따르면, 이를 위해서는 배를 추진하는 장치에 상관없이 배가 받는 저항과 같은 크기의 추진력을 발생시킬 수 있어야 한다. 추진 장치는 19세기 후반 범선(sailing ship)에서 증기기관을 사용하는 기선(steam ship)으로 바뀌면서 커다란 변화를 겪었다. 범선의 속도는 바람

에따라 정해졌지만, 기선의 속도는 배를 짓기 전에 미리 저항의 크기를 알아 적당한 기관(engine)과 추진기(propulsor)를 설치해야 얻을 수 있었다. 이를 위해 프루드(Froude, 1810-1879)는 모형시험(model test) 기법을 도입하였고, 그의 방법은 오늘날도 본질적으로는 큰 변화 없이 적용되고 있다.

셋째 성질, 즉 구조적으로 안전해야 한다는 점은 17세기 전반 갈릴레오(Galileo, 1564-1642)에 의해 역학 문제로 변환되어 결국 재료강도학(strength of materials) 또는 재료역학(mechanics of materials)의 발전을 초래하였다. 베네치아 국영 조선소의 기술자문관(consultant)으로 위촉되었던 갈릴레오는 날로 대형화하는 목선의 건조와 더불어 발생한 문제를 해결하는 과정에서 역학적으로 매우 중요한 세 가지를 발견하였다. 하나는 수학을 실제 문제의 해결에 과감하게 도입해야 한다는 것인데, 물론 이는 아리스토텔레스(Aristotle, BC384-322) 이래의 철학적 믿음과 정면으로 배치되는 것이었다. 또 하나는 갈릴레오가 수행한 것으로 알려진 여러 가지 실험과 관련하여 잘 알려진 대로 실제 문제의 해결에 실험이 사변적 논리성보다 훨씬 중요함을 강조한 것이었다. 마지막으로 기하학적 상사성(similitude)이 역학적 상사성을 보장하지 않는다는 매우 일반적인 문제에 대한 성찰을 요구한 것이었다.

갈릴레오는 선수와 선미의 두 부분에서 지지되어 건조되던 배가 자중 때문에 선체 중앙부에서 파괴되는 문제를 생각하는데, 배를 보(beam)로, 또 배의 자중은 보에 가해지는 하중(load)으로 바꾸어 생각하여, 하중에 의해 파괴되는 보의 문제로 바꾸어 생각하였다. 이렇게 얻어진 문제에 그는 당시에 알려져 있던 거의 유일한 역학 법칙, 즉 지레의 원리(principle of lever)를 적용하여 만약 기하학적으로 상사하게 배를 대형화한다면, 어느 시점에서나 대형화된 배는 자중을 견딜 수 없어 반드시 파괴된다는 것을 보였다. 배를 보로 이상화하는 방법은 지금도 선박구조설계에 기본적으로 쓰이고 있는데, 이것이 갈릴레오에 의해 시작된 것임은 그다지 잘 알려지지 않았다.

위에서 배의 정의와 관련하여 역학적으로 간단히 살펴본 것만으로도 조선공학자(naval architect)가 재료역학, 동역학, 열역학, 유체역학에 대한 기본적 소양을 갖추지 않는다면 구조적으로 안전하며 효율적인 성능의 배를 설계, 건조하기가 가능하지 않을 것임을 알 수 있다. 더구나 앞으로 무인자율운항선과 같은 새로운 형태, 성능을 가진 선박을 설계, 건조해야 할 것을 고려하면, 위에서 언급한 4대 역학에 대한 기본적 소양은 더욱 중요할 것이라고 단언할 수 있다. 물론 빅데이터(big data), 인공지능(artificial intelligence) 등의 영향으로 컴퓨터의 도움을 받을 수 있는 분야가 갈수록 늘어나겠지만, 반면 지금까지와는 다른 필요 때문에 제기되는 선박의 다양한 성능을 보장하기 위해서는 역학의 중요성이 오히려 갈수록 증대할 것으로 보이기 때문이다.

이하에서는 더욱 자세하게 4대 역학이 역사적으로 선박과 어떻게 연관되어 있는지를 알아보기로 한다. 재료역학, 동역학, 열역학, 유체역학에 대해 차례대로 살펴보고, 마지막으로 “맺는말”에서 종합적인 결론을 도출하기로 한다.

2. 재료역학

재료역학을 혹자는 ‘갈릴레오의 제1 신과학(first new science)’이라고 부르기도 한다. 1638년 발표된 그의 저술, <두 새로운 과학(Two new sciences)>¹⁾에서 갈릴레오는 재료역학과 관련된 첫째 날의 제목을 다음과 같이 붙였다.

First new science, concerning the resistance of solid bodies to separation.

제1 신과학, 파괴에 대한 고체의 저항에 관하여. (이승준 역)

갈릴레오의 삶과 조선공학 전반에 대한 기여는 ‘대학에서의 조선공학 교육의 기원’²⁾, ‘갈릴레오와 조선공학’³⁾을, 재료역학의 기원에 대해서는 <역사로 배우는 재료역학>⁴⁾, ‘Strength of materials의 기원’⁵⁾을 각각 참조하기를 바란다.

거의 모든 시대에 걸쳐 배를 만드는 사람들은 더 큰 배를 만들어 달라는 상인이나 해군의 요구를 만족시키기 위해 노력해야 하였으며, 이는 배가 클수록 화물이나 무기를 많이 실을 수 있기 때문이었다. 배가 커지면서 구조재로 쓰이는 나무의 강도로는 배의 구조적 안전성을 확보하기 점점 어려워지고 있었고, 16세기 말에는 이미 그 한계점에 도달하고 있었다. 당시에는 선대를 사용하여 배를 건조하였는데, 건조되는 동안 선체는 선수부와 선미부에서 지지되고 있었다. 배가 커지자 배 자체의 무게에 기인하는 하중이 증가하여 너무 큰 배를 짓고자 할 때 길이 방향 중앙부에서 짓고 있는 배가 파괴되는 일이 발생하였다. 따라서 배의 크기와 건조 중에 발생하는 중앙부에서의 파괴 사이의 관계를 알아야 할 필요가 생겼다.

갈릴레오는 1592년 베네치아의 영내에 있던 파도바대학의 교수가 되었다. 당시 전성기를 구가하고 있었던 베네치아는 3,300 척의 배를 가지고 있었으며 이를 위해 36,000 명의 선원을 보유하고 있었고, 또한 국영 조선소인 아르세날레(Arsenale)는 이와 같은 선단의 유지 보수를 위해 16,000 명의 조선 인력을 공무원으로 고용하고 있었다.⁶⁾ 아르세날레는 매해 300 척의 갤리(galley)를 건조하였다고 알려져 있는데, 배의 대형화와 관련된 문제는 이들에게도 시급하게 해결해야 할 과제였으며, 갈릴레오는 이를 포함한 다양한 문제의 해결을 위해 기술 자문관(consultant)으로 위촉되었다. 그는 40 년 이상의 시간에 걸쳐 이들 문제와 씨름하였으며 그와 같은 노력의 결과물이 위에서 언급한 <두 새로운 과학(1638)>이라고 할 수 있다.

배의 대형화에 따른 파괴와 관련된 문제를 다룸에 있어 갈릴레오가 사용할 수 있었던 역학 법칙은 아마도 지레의 원리가 유일하지 않았을까 생각되는데, 그는 실제 문제를 해결하기 위해 이 원리를 적용할 수 있는 소위 이상화된 문제를 먼저 얻어야 했다. 실제 문제로부터 이처럼 역학적, 수학적 원리를 적용할 수 있는 문제를 얻어내는 것을 이상화(idealization)라고 부른다. 아리스토텔레스 이후 서양 철학자들은 실제 문제에 수학을 적용하는 것에 대해 꽤 큰 반감을 보여왔다. 당시의 수학, 즉 기하학은 정의된 개념, 예를 들면 점, 직선, 평면 등으로 이루어진 추상적 체계(abstractness)임에 반해, 실제 세상(concreteness)에는 점, 직선, 평면으로 간주할 수 있는 것이 존재하지 않기 때문이라는 논리에 근거한 주장이었다. 갈릴레오는 1632년 그의 저술, <두 주된 우주 체계에 관한 대화(Dialogue concerning the two chief world systems)>에서 다음과 같이 말하였다.

Just as the accountant who wants his calculations to deal with sugar, silk, and wool must discount the boxes, bales, and other packings, so the mathematical scientist, when he wants to recognize in the concrete the effects he has proved in the abstract, must deduct any material hindrances; and if he is able to do that, I assure you that things are in no less agreement than are arithmetical computations. The trouble lies, then, not in abstractness or concreteness, but with the accountant who dose not know how to balance his books.

(포장된) 설탕, 비단, 양털의 무게를 구할 때 회계사는 상자, 끈 등 기타 포장재의 무게를 제외해야만 한다. 마찬가지로 과학자도 수학을 사용하여 추상적 체계에서 증명한 것을 실제 세상에서 확인하려고 할 때, 어떠한 물질적 저해 요인도 제외해야만 한다. 만약 과학자가 그렇게 할 수 있다면, 보장하건대, 산술 계산(사칙연산) 이상으로 일치하는 결과를 얻을 것이다. 그렇다면, 문제는 추상적이냐 또는 실제적이냐 하는 것에 있지 않고 오히려 회계 장부를 어떻게 결산하는지 모르는 회계사에게 있다. (이승준 역)

다시 말하면 수학을 어떻게 사용할지 모르는 과학자에게 문제가 있는 것이지, 수학의 추상성이 문제가 될 수 없다고 갈릴레오는 주장한 것이다.

그는 더 큰 배를 건조하는 상황의 모호성을 줄이기 위해 문제의 본질은 바뀌지 않지만 보다 쉬운 문제로 바꾸어, 배의 기하학적 상사성은 유지하면서 그 크기만 키우는 문제를 생각하기로 하였다. 한편 선수와 선미에서 지지되어 있는 배를 좌우 양단에서 지지되어 있으며 단면이 균일한 상자, 즉 보(beam)로 간주하였다. 이 보의 길이를 L 이라고 할 때, 자중에 의한 파괴와 관련된 문제를 생각하는 한, 이 보는 길이가 $L/2 \equiv l$ 인 외

<두 새로운 과학>, 둘째 날에서는 그림 1에 보인 외팔보의 파괴와 관련된 논의가 중점적으로 이루어지고 있다. 이 논의에서 갈릴레오는 자유단에서 하중을 받는 외팔보의 파괴는 점 B 부분에서 일어나며, 파괴에 대한 저항(resistance)은 단면을 구성하는 올(filament)에 의해 제공되는 것으로 보아 그 면적에 비례해야 하고, 그 합은 고정단의 단면 AB의 중심에 작용한다고 가정하였다. 따라서 파괴에 대한 저항 R 은 l^2 에 비례하며, 저항의 점 B에 대한 모멘트 M_r 은 l^3 에 비례함을 얻었다. 한편, 자중 W 는 l^3 에 비례하며, 그 반이 자유단에 작용하는 것으로 간주하고 있으므로 자중 즉 이 집중 하중의 점 B에 대한 모멘트 M_w 는 l^4 에 비례함을 얻었다.



<그림 1 갈릴레오의 외팔보 문제, <두 새로운 과학>으로부터>

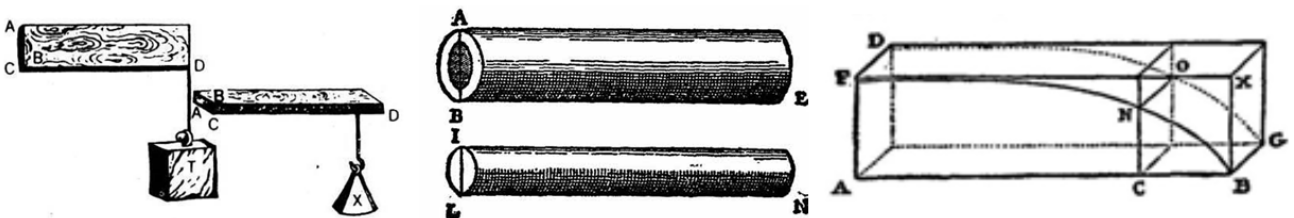
파괴가 일어날 때 지레의 원리를 적용하고 위에서 얻은 결과를 이용함으로써 그는 명제 7에서 기하학적으로 상사한 보의 경우, 파괴가 일어나는 외팔보의 크기는 저항에 의한 모멘트 M_r 과 자중에 의한 모멘트 M_w 를 등치 함으로써 유일하게 정할 수 있음을 보였다. 또한 파괴가 일어나는 외팔보보다 큰 보에 대해서는 모두 $M_w > M_r$ 이 성립하므로 파괴될 것이며, 작은 보에 대해서는 모두 $M_w < M_r$ 이 성립하므로, 어느 정도의 추가적인 하중을 견디어 낼 수 있을 것임을 보였다.

위에서 보인 것과 같은 과정을 거쳐 갈릴레오가 이상화된 문제를 만들고 당시에 알려진 물리 법칙을 사용하여 얻었던 결과가 의미하는 것을 제대로 이해하기 위해 당시의 상황을 좀 더 정확하게 알아보기로 한다. 당시의 수학은 기하학을 뜻했고, 대수방정식의 사용은 아직 보편화되지 않았으며,⁷⁾ 대부분의 계산은 비례 또는 비례식을 이용하여 이루어져야만 했다. 뉴턴과 라이프니츠에 의해 미적분이 알려진 것은 갈릴레오 사후 약 45년이 지나서 이루어진 일이었다. 또한, 물체의 운동 법칙은 1687년 뉴턴의 <프링키피아(Principia)>를 통해 발표되었으므로, 운동량(momentum)의 개념이 확립되지 않은 시점이었다. 갈릴레오는 모멘트라 는 용어를 힘에 의한 모멘트뿐만 아니라 운동량에 대해서도 명확한 구분 없이 사용하고 있었다. 나아가 물체가 힘을 받는 경우, 변형이 일어나며 그 변형의 크기가 대부분 재료에 대해 힘의 크기에 비례한다는 탄성(elasticity)에 관한 사실도 훅크(Hooke, 1635-1703)에 의해 1675년에 알려졌으므로, 갈릴레오가 보의 파괴가 일어나기 전에 변형이 일어난다는 점을 알고 있었음에도 변형에 관한 연구는 아직 한 걸음도 진전시키기 힘들었다.

Dialogues of Galileo Galilei containing two whole sciences, all new and demonstrated from their first principles and elements so that, in the manner of other mathematical Elements, roads are opened to vast fields; and discourses filled with infinite admirable conclusions by which more remains to be seen in the world than has been seen up to the present time. (S. Drake의 영어 번역)⁸⁾

두 온전한 과학을 포함하는 갈릴레오 갈릴레이의 대화, 전적으로 새로우며 제1 원리와 요소들로부터 증명된, 그러므로 유클리드의 <기하원론(Elements)>과 같은 방식으로, 광대한 분야들로의 길을 열다; 무한히 존경스러운 결론들로 가득 차 있는 담론, 이 결론에 따라 지금까지 알려진 것보다 더욱 많은 일들이 세상에 알려질 것이 기대된다. (이승준 역)

갈릴레오는 자신이 쓴 <두 새로운 과학>이 유클리드(Euclid, 대략 BC325-270)의 <기하원론>이 수학에 끼친 것과 같은 영향력을 과학에 끼칠 것을 알고 있었다. 단 <두 새로운 과학>을 출판한 사람들에게 그와 같은 주장은 너무 오만한 것으로 보였던지, 그가 보낸 표지는 매우 다른 형태로 바뀌고 말았다. 갈릴레오의 주장대로 그가 얻었던 결과보다 훨씬 크고 많은, 이루 헤아리기 힘든 결과들이 뒤를 이어 세상에 나타났지만, 안타깝게도 근대과학의 선구자라는 명칭은 뉴턴을 위시한 그의 후배들에게 주어지고 만 것으로 보인다. 기하학적으로 상사한 보 자체의 무게에 의한 파괴에 대해 얻어진 결론을 사용하여 갈릴레오는 즉각적으로 많은 인공 및 자연 현상에 대한 설명을 시도하였다. 크기가 무한한 물체를 만든다는 것은 불가능하며, 물질의 강도(strength) 자체에 변화가 없다면 일상적으로 우리 주변에서 볼 수 있는 물체들의 크기를 키우는 데는 한계가 있음을 밝혔다. 예를 들어 사람과 모습은 같지만, 키가 열 배나 큰 거인의 뼈가 사람의 뼈와 같은 재질로 만들어졌다면 거인의 뼈는 자중 때문에 파괴될 것이라고 하였다. 단면의 폭과 두께가 매우 다른 자(ruler)와 같은 물체를 세워서 보로 쓸 때와 눕혀서 보로 쓸 때, 단면적이 같으므로 저항 R 의 크기는 같지만, 전자의 경우 M 의 팔이 후자보다 훨씬 크다는 점을 지적하며 이와 같은 결과가 실제 경험과 잘 합치한다고 하였다. 또한 단면적이 같은 경우에는 고정단의 중심이 파괴가 발생하는 점 B 로부터 멀 때 M 이 증가하므로, 갈대를 비롯한 다양한 식물이나 창과 같이 중공(hollow)형의 단면을 가지는 것이 파괴의 관점에서 훨씬 이로운 것을 보였다. 나아가 보의 길이방향으로 횡단면의 면적을 포물선처럼 변화하여 자유단으로부터 가까운 곳의 면적을 감소시킴으로써 모든 횡단면이 상대적으로 같은 세기(equal strength)를 가지도록 할 수 있으며, 이 경우 재료의 1/3을 절약할 수 있음을 보였다. 그림 2에 그의 설명과 관련하여 <두 새로운 과학>에 보인 그림들을 그대로 보였다.



<그림 2 갈릴레오의 파괴에 관한 결과를 적용한 예, <두 새로운 과학>으로부터>

위에서 설명한 주어진 실제 문제에 대한 갈릴레오의 접근 방법은 두고두고 다음 세대의 과학자와 공학자에 의해 반복된다. 실제 문제를 풀 수 있는 수학적 형태의 문제로 간단화 또는 이상화하고, 이 문제에 적절한 과학적 법칙을 적용하여 수학적으로 주어지는 결과를 얻으며, 얻어진 결과가 우리의 경험과 일치하는지 확인하고, 더욱 많은 유사한 실제 문제들에 대해 확장 적용하고자 하는 방법론은 그에 의해 제1 신과학과 관련하여 확립되었다고 할 수 있다. 그가 얻은 재료역학적 결과도 물론 중요하지만, 그가 보인 방법론은 그가 예견

적 상사성을 보장하지 않는다 라고 쓸 수 있다 이 명제는 차후 기하학적으로 상사한 모형을 사용하여 실험을 수행하는 모든 사람에게 역학적 상사성의 보장을 위한 방법을 생각하도록 만들었다. 그가 의도했던 것으로 갈릴레오는 과학에서 실험의 역할과 그 방법론에 대해 큰 영향을 끼쳤다. 오늘날 모형시험과 관련된 차원해석(dimensional analysis)의 기원은 갈릴레오까지 연결되어 있음을 알 수 있다.

갈릴레오는 <두 새로운 과학>에서 아르세날레의 조선장들과의 대화에서 많은 영감을 받은 것을 전하고 있으며, 그의 결과가 조선장들에 의해 이해될 수 있기를 위하여 제1 신과학과 관련된 부분은 라틴어가 아닌 이탈리아어로 기술하였다. 오늘날 대학의 조선 관련 학과에서 갈릴레오의 제1 신과학, 즉 재료역학이 제대로 다루어지지 않는다면 조선공학도는 아마도 조선과 관련하여 가장 먼저 탄생한 과학을 배울 기회를 잃는 것이라고 할 수 있다.

3. 동역학

동역학(dynamics)이라는 단어는 18세기 말부터 쓰이기 시작했는데, 역학의 분야가 다양해 짐에 따라 원래의 mechanics를 대신하는 용도로 사용되었다. 따라서 dynamics의 역사는 mechanics의 역사라고 할 수 있는데, 물론 좁은 의미로 정역학(statics)은 움직이지 않는 계를, 동역학은 움직이는 물체를 다루는 분야를 각각 뜻하기도 하지만, 여기에서 동역학은 원래의 mechanics와 동의어로 간주하기로 한다. 동역학의 기원에 대해서는 <역사로 배우는 동역학>⁹⁾ 'Dynamics의 기원'¹⁰⁾을 각각 참조하기를 바란다.

그리스 철학자들은 물체의 운동을 자연철학(natural philosophy)의 일부로 다루었다. 지구상에서 일어나는 물체의 운동뿐만 아니라 하늘에서 빛을 발하는 해, 달과 별들, 즉 천체의 운동은 그 규칙성에서 인류의 관심을 끌 수밖에 없었다. 물체의 운동 중 가장 먼저 인지될 수 있었던 것은 아마도 사과나 감이 익었을 때 나무에서 떨어지는 운동, 즉 자유낙하(free fall)였을 가능성이 크다. 수렵 생활에 익숙했던 사람들이라면 짐치창이나 화살의 움직임에도 익숙해졌을 것이다. 농경 생활에 접어들면서는 농사와 관련하여 천체 운동의 규칙성과 불규칙성에도 관심을 쏟지 않을 수 없었을 것이다.

<두 새로운 과학>에서 갈릴레오는 동역학과 관련된 셋째 날의 시작 부분을 다음과 같이 썼다.

Second new science, of local motions.

We bring forward a brand new science concerning a very old subject. There is perhaps nothing in nature older than MOTION, ---

제2 신과학, 국부 운동에 관하여.

매우 오랜 주제에 대해 전적으로 새로운 과학을 선보일까 합니다. 아마도 사실상 운동보다 더 오래된 것은 없을 것입니다, --- (이승준 역)

아리스토텔레스는 자유낙하를 자연 운동(natural motion)이라고 불렀으며, 한편, 운동의 원인과 결과가 다른 물체에 영향을 끼치지 않는다는 관점에서 국부 운동(local motion)이라고도 불렀다. 그리스 시대에도 다루어졌던 운동에 대한 논의이지만, '전적으로 새로운 과학'이라고 갈릴레오는 말하고 있는데, 이는 당시의 학계가 추종하고 있던 아리스토텔레스의 논리로부터 완벽하게 벗어날 것임을 암시하고 있었다. 한편 창이나 화살과 같이 던져지거나 쏘아진 물체, 즉 포사체(projectile)의 운동은 이해하기 어려운 운동이었는데, 일단 사람에게서 떨어지고 나면 힘을 받고 있지 않은데도 계속 날아가기 때문이었다. 이러한 운동은 격렬 운동(violent motion)이라고 불렸으며, <두 새로운 과학>의 넷째 날 대화의 주제이다. 갈릴레오가 '제2 신과학'이라고 부른 것은 바로 이러한 물체의 국부 운동과 격렬 운동에 대한 해석이다.

제2 신과학에서 갈릴레오의 최종적인 과제는 포사체의 운동, 즉 격렬 운동의 해석이었는데, 이에 대해서는 몇 가지 이유를 찾을 수 있다. 파도바대학의 교수로 채용된 후에도 꽤 궁핍한 생활을 지속할 수밖에 없었던 그는 학생 중 미래의 포병 장교들에게 탄도학(ballistics)을 가르치는 것을 부업으로 삼아 상당한 수입을 올

온(galleon) 등 새롭게 개발된 함정의 선측에 함포를 적재함으로써 현측 일제사격(broadside attack)과 같은 새로운 전술을 도입하고 있었다. 베네치아의 국영 조선소였던 아르세날레에서는 육군과 해군용 각종 대포를 양산하여 유럽 각국에 공급하고 있었으므로, 기술 자문관이었던 갈릴레오의 입장에서 격렬 운동의 해석은 매우 중요한 과제였다. 유럽 각국의 언어에서 arsenal이 병기창을 뜻하게 된 것은 베네치아 아르세날레의 바로 이와 같은 역할 때문이었다. 한편, 당시의 학계는 아리스토텔레스의 논리를 그대로 따르고 있었기 때문에 천체와 포사체의 운동을 제대로 설명하지 못하고 있었다. 여기에 망원경(telescope)의 발견에 따라 천체에 대한 새로운 이해가 받아들여지기 시작하였고, 태양 중심설(heliocentric theory)도 점차 설득력을 얻어가고 있었으므로, 학문적인 관점에서 포사체의 운동 해석은 매우 시급한 과제였다.

1687년 뉴턴의 만유인력 법칙(law of universal gravitation)이 알려진 후에는, 오늘날 우리가 알고 있는 중력에 대한 설명이 가능하게 되었지만, 갈릴레오는 아직 중력의 이와 같은 성질에 대해 알지 못하였다. 그는 자유낙하를 다룸에 있어 실험과 관련하여 많은 일화로 알려져 있는데, 자유낙하 대신 마찰을 최소화한 경사면을 이용하여 최대한 정확한 실험값을 얻을 수 있었다.¹¹⁾ 실험 결과로부터 정지 상태에서 경사면을 따라 운동을 시작할 때, 그 운동 거리는 경과한 시간의 제곱에 비례한다는 소위 시간제곱 법칙(times-squared law)을 확인할 수 있었으나, 이 법칙을 이론적으로 도출하는 것은 불가능에 가까웠으므로, 셋째 날의 국부 운동에 대한 논의에서 자유낙하를 자연가속 운동(naturally accelerated motion)이라고 불렀으며, 여기서 자연가속은 실험으로 균일가속(uniformly accelerated)의 성질을 가짐을 확인할 수 있다고 다음과 같이 기술하였다.

But since nature does employ a certain kind of acceleration for descending heavy things, we decided to look into their properties so that we might be sure that the definition of accelerated motion which we are about to adduce agrees with the essence of naturally accelerated motion. And at length, after continual agitation of mind, we are confident that this has been found, chiefly for the very powerful reason that the essentials successively demonstrated by us correspond to, and are seen to be in agreement with, that which physical experiments show forth to the senses.

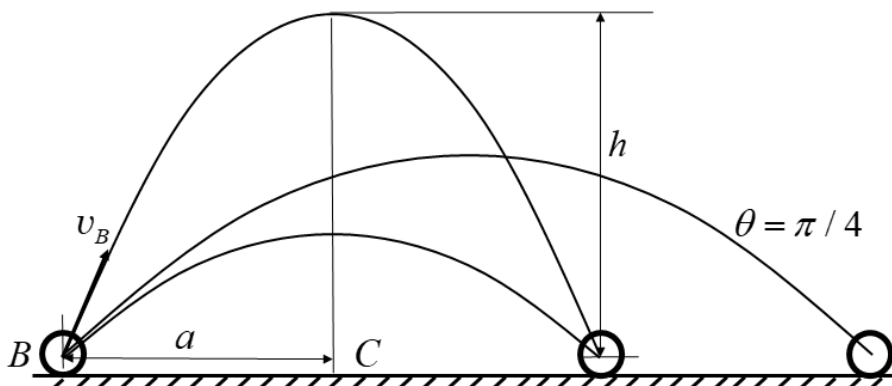
자연은 하강하는 중량물에 일정한 가속성을 부여하므로, 그 성질에 대해 들여다보기로 하였으며, 그럼으로써 이제 제시하고자 하는 (균일)가속 운동의 정의가 자연가속 운동의 본질과 일치하는 것을 확신할 수 있을 것입니다. 지속적인 번민 끝에 드디어 이 정의가 발견되었다고 확신합니다. 이에 대한 강력한 이유는 먼저 물리 실험이 우리의 감각에 제시하는 본질적 속성과 우리가 차례대로 보일 (균일가속 운동의) 다양한 속성이 상응하며 잘 일치하는 것으로 보이기 때문입니다. (이승준 역)

오늘날 우리는 속도를 정의하는 데 미분을 사용한다. 이렇게 정의된 속도는 통상 순간속도(instantaneous velocity)라고 부르는데, 갈릴레오가 비록 수학 교수였지만, 뉴턴이나 라이프니츠에 의해 그의 사후에야 알려진 미적분을 알지 못하는 상황에서 이와 같은 속도의 개념을 사용하여 논의를 진행하는 것은 불가능하였다. 그는 셋째 날의 논의에서 균일운동(uniform motion), 즉 속도가 일정한 운동과 균일가속 운동, 즉 속도의 증분이 일정한 운동의 두 운동만을 다루었다.

한편, 경사면을 따른 운동을 고려하면서 갈릴레오는 그 극한적인 상황으로 자유낙하(경사각 90°)와 수평면(경사각 0°)을 따른 두 경우를 생각하였다. 경사면을 따른 운동에 대한 실험으로부터 얻은 결과를 자유낙하에 그대로 적용할 수 있다는 것을 확인한 그는 수평면을 따른 운동에 대한 고려에서 매우 중요한 결과를 얻었다. 경사면을 따른 물체의 운동은 균일가속 운동인데, 수평면을 따른 운동에서의 가속도는 영이므로, 마찰이 없다고 가정할 때 속도의 변화가 없는 균일 운동이 되어야 한다는 점이였다. 이 결과는 일견 매우 사소한 것처럼 보이지만, 물체가 운동할 때 힘을 가하면 속도가 발생한다는 아리스토텔레스 이래의 뿌리 깊은 믿음을 송두리째 흔들었다. 힘을 가하면 속도가 변화한다는, 즉 가속도가 발생한다는 뉴턴의 생각과 아슬아슬할

도 갈릴레오의 천재성이라고 할 수밖에 없다 그는 포사체의 운동에 대해 당시에는 전혀 알려지지 않았던 방향성을 가진 양, 즉 오늘날의 용어로는 벡터량의 개념을 사용하여, 포사체의 운동을 수평방향과 연직방향의 두 성분으로 분해하여(decompose) 생각하였다. 실제로 벡터 표기법은 1901년이 되어서야 깁스(Gibbs, 1839-1903)의 강의에 기초하여 작성된 <벡터해석{Vector analysis}>과 더불어 널리 알려지기 시작하였으므로 약 300 년을 뛰어넘는 선구적인 생각이었다. 일단 운동을 두 방향으로 분해하자 수평방향 운동은 마찰이 없는 수평면을 따른 균일 운동과 같아야 하며, 연직방향 운동은 자유낙하, 즉 균일가속 운동과 같아야 한다는 결과가 거의 자연스럽게 얻어질 수 있었다. 따라서 수평방향으로 포사체가 움직인 거리는 시간에 비례해야 하고, 연직방향 운동은 시간 제곱 법칙에 따르므로, 결국 포사체의 궤적은 포물선(parabola)이 되어야 함을 보일 수 있었다. 포사체의 운동이 기하학적 곡선을 따른다는 결과는 지상의 물체는 직선, 천체는 원을 따라 움직인다고 생각하던 기존 학계의 사람들에게 아마도 대단한 충격이었을 것이다.

갈릴레오는 초속도(v_B)의 크기가 같다고 가정하고, 포사체의 발사각(angle of elevation= θ)이 변화할 때, 도달거리의 반인 진폭(amplitude= a)과 고도(altitude= h)를 넷째 날의 표 1과 표 2로 각각 주었다. 이 표들로부터 발사각이 45° 일 때, 진폭, 즉 도달거리가 최대인 것과 45° 에서 같은 각도를 빼고 더했을 경우 진폭은 같은 값을 얻음을 확인할 수 있으며, 이 자료에 근거하여 그림 3과 같은 결과를 얻을 수 있는데, 이 부분과 관련하여 더 자세한 사항은 각주 2)의 '갈릴레오와 조선공학'을 참조하기를 바란다.



<그림 3 포사체의 궤적, <두 새로운 과학>의 넷째 날 표 1, 표 2로부터>

포물선이라는 용어에 대해 잠깐 생각하기로 한다. 기하학에서 생각하는 포물선(parabola)은 원추를 경사면에 평행한 평면으로 잘랐을 때 얻어지는 단면의 형상으로 정의하며, 쌍곡선(hyperbola), 원 등과 같이 원추곡선으로 다룬다. 그런데 갈릴레오는 포사체의 궤적이 포물선임을 보였다. 여기서 포물선(拋物線)은 던져진 물체(拋物), 즉 포사체가 그리는 곡선이라는 뜻이므로, 포물선을 기하학적으로 정의하고 있는 서양의 언어로 포사체(projectile)의 궤적이 parabola라고 할 때는 새로운 정보가 추가된 문장이 되지만, 우리말로 포사체의 궤적이 포물선이라고 하고 말 그대로 해석하면 새로운 정보가 전혀 더해지지 않은 표현이 되고 만다. 물론 이는 기하학이 한자 문화권에 처음 들어왔을 때, parabola가 포사체의 궤적임을 알게 되었던 당시 지식인들의 경탄이 반영된 것에 기인하는데, 21세기에도 아직 이러한 용어가 그대로 쓰이고 있다는 것은 받아들이기 힘든 것으로 보인다. 최소한 기하학적으로 정의된 포물선에 대한 이름을 만들고 널리 사용해야 할 것으로 생각한다.

뉴턴은 만유인력 법칙에 기반하여 중력(gravity)의 성질과 크기를 산정할 수 있었고, 1687년 <프링키피아>에서 물체의 운동과 관련하여 세 법칙을 도입함으로써 역학을 유클리드의 기하학과 같은 연역 체계로 만들었다. 잘 알려진 바와 같이 법칙은 증명을 요하지 않으며, 뉴턴은 이들을 공리(axiom) 또는 법칙(law)이라고 불렀다. 갈릴레오의 <두 새로운 과학>과 마찬가지로 뉴턴의 <프링키피아> 역시 '새로운 과학'으로의 문을 열었지만, 일반적인 물체의 운동을 다루는 역학 체계를 제공하기 위해서는 아직 많은 사람의 노력과 시

할 수 있는 사람으로 오일러 를 들 수 있다 뉴턴이 도입한 세 법칙에서 물체 라 고 약간은 애매하게 표현된 개념과 관련하여 그는 1736년 최초의 역학 교과서인 <역학{Mechanica}>에 서 질점(mass point)을 새롭게 정의함으로써 뉴턴의 법칙에서 말하는 물체와 운동의 의미를 확실히 하였 다. 또 1765년에는 <고체 또는 강체의 운동론{Theory of motion of solid or rigid bodies}>에서 강체 의 회전운동(rotation)과 관련하여 관성모멘트 텐서(moment of inertia tensor)를 정의하여, 강체의 운 동이 병진운동(translation)과 회전운동으로 구성되는 것을 보였다.

여기서 회전운동은 특히 그가 1749년 저술한 <선박과학{Scientia Navalis}>에서 배의 횡동요(roll)와 관 련하여 고려하기 시작한 것이었다. 함정에 더욱 많은 수의 대포를 적재하면서 갑판의 수가 증가하였고, 이들 갑판에 비교적 중량물인 대포가 놓이자 배의 횡경사 및 횡동요에 대한 복원성 또는 안정성(stability)¹²⁾이 심각하게 훼손되었다. 따라서 안정성에 대한 지표(index)를 확정하고 이를 사용하여 배가 건조되기 전에 짓 고자 하는 배의 안정성을 확보할 방법을 얻고자 하게 되었다.

프랑스 과학아카데미는 1714년부터 지정된 문제의 해결을 위한 논문에 상금을 거는 제도를 시행하고 있었 는데, 프랑스 해군과 밀접한 관련이 있었으므로 많은 문제가 배의 성능 개선과 관련되어 있었다. 부게 (Bouguer, 1698-1758)와 오일러는 이런 제도를 통해 배와 관련된 문제에 관심을 가지게 되었으며, 부게 는 1746년 <선박개론{Traite du Navire}>을, 오일러는 1749년 <선박과학>을 각각 집필하였다. 부게의 책은 처음부터 프랑스 해군의 조함관(naval constructor) 교육을 위한 교과서로 사용될 목적으로 작성되 었으며, 반면에 오일러의 책은 관련 학자들을 독자로 상정한 논문으로 쓰였다.

부게는 <선박개론>에서 배의 횡경사에 대한 안정성을 생각하면서 아르키메데스에 의해 알려진 부유체의 안정성에 관한 논의에 근거하여 부심의 위치 변화에 따른 복원모멘트(restoring moment)를 고려하였다. 그는 일반적인 형상의 배에 적용할 수 있는 메타센터(metacenter)의 개념을 도입하였으며, 무게중심(G) 과 메타센터(M) 사이의 거리, 즉 메타센터 높이(metacentric height= \overline{GM})에 대해 메타센터가 무게중 심의 위에 있을 때를 $\overline{GM} > 0$ 이라고 하면, $\overline{GM} > 0$ 의 조건을 만족하여야만 복원모멘트가 발생하여 배 의 횡경사 안정성이 확보될 수 있다는 것을 보였다. 부심(center of buoyancy)과 메타센터 사이의 거리(= \overline{BM})는 수선면(waterplane)의 형상과 배수량(displacement)에 따라 결정되므로, 차후 프랑스 해군의 함정은 기본설계 도면에 반드시 \overline{BM} 의 값을 포함하도록 하였으며 표준 상태에서 $\overline{GM} > 0$ 의 조건을 만 족하는 것을 확인하도록 요구하였다.

오일러는 <선박과학>에서 배의 횡동요에 대한 운동 방정식을 유도하고자 하였으며, 이 과정에서 매우 중요 한 결과들을 얻었다. 부력의 존재와 관련하여 유체 내부에 작용하는 압력(pressure)을 처음으로 중력과 연 관 지었으며, 정지해 있는 유체 내부의 압력, 즉 수정압(hydrostatic pressure)은 유체의 표면으로부터의 거리에 비례하고, 그 비례상수는 유체의 비중량임을 보였다. 그가 고려한 압력은 유체 내부의 모든 점에 작 용하는 내력(internal force)으로서의 최초의 예였다. 나아가 물체에 작용하는 부력은 물체 표면에 작용하 는 이러한 수정압의 연직방향 성분을 적분하여 얻을 수 있음을 보임으로써 아르키메데스의 원리가 더 이상 증명할 수 없는 것이 아님을 보였다.

또한 횡동요에 대한 운동 방정식에서 고려되어야 하는 수정압에 기인하는 복원모멘트는 직립 평형 상태로 부터 임의의 각도로 경사한 배의 표면에 작용하는 수정압의 무게중심에 대한 모멘트를 적분하여 얻었으며, 횡동요의 경사각이 작을 때 복원모멘트는 \overline{GM} 에 비례함을 보였다. 따라서 만약 배의 운동에 기인하는 압 력 성분, 즉 수동압(hydrodynamic pressure)을 무시할 수 있다면 다음과 같은 형태의 횡동요에 대한 운 동 방정식을 얻을 수 있음을 보였다.

$$I\ddot{\theta} + \overline{GM}\theta = 0. \quad (1)$$

을 것임을 보일 수 있었다. 나아가 횡동요의 고유 진동수는 \sqrt{GM} 에 비례하므로, 안정성만 고려하여 \overline{GM} 을 필요 이상으로 크게 할 경우, 횡동요의 고유 진동수가 증가하여 승객이나 화물에 바람직하지 않은 영향을 미칠 것임을 지적하였다.

위의 논의로부터 미적분과 물체의 운동 법칙이 알려진 지 60-70 년이 지난 18세기 중엽에 이르면, 이제 식 (1)과 같은 미분방정식의 해로부터 실질적인 문제의 공학적 성질에 대한 해답이 얻어지고 있음을 알 수 있다. 갈릴레오에서 뉴턴, 뉴턴에서 오일러로 이어지는 '새로운 과학'의 발전은 사실 이제 막 시작되었을 뿐이었으며, 그 과정에서 배와 관련된 문제들이 역학 및 수학 발전의 결정적인 촉매제 역할을 하였다. 오늘날 대학의 조선 관련 학과에서 갈릴레오의 제2 신과학, 즉 동역학이 제대로 다루어지지 않는다면 조선공학도는 아마도 선박과 관련하여 그 뼈대와 골조가 형성된 과학을 배울 기회를 잃는 것이라고 할 수 있다.

주석

- 1) 저술의 이름은 < > 안에 나타내기로 하며, 원어 또는 영어 제목을 병기할 때는 { } 안에 쓰기로 한다. 원래 제목은 <Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a due nuove scienze>로 <두 새로운 과학에 관한 담론과 수학적 증명>이나, 줄여서 <두 새로운 과학>이라고 부르기로 한다. 이 책은 세 사람 사이에 벌어진 나흘 동안의 대화를 기록한 형식으로 구성되었다. 앞의 이틀은 오늘날 우리가 재료역학이라고 부르는 내용, 뒤의 이틀은 동역학이라고 부르는 내용에 관한 것인데, 전자는 피렌체 지방의 이탈리아어로 후자는 라틴어로 쓰였다.
- 2) 논문, 칼럼 등의 제목은 ' ' 안에 나타내기로 한다. 이승준, '대학에서의 조선공학 교육의 기원', 대한조선학회지, 55권 1호 칼럼(3), 2018년 3월. 칼럼 뒤 (3)은 대한조선학회지에 2017-2020년 동안 12회에 걸쳐 연재된 칼럼의 일련번호를 나타낸다.
- 3) 이승준, '갈릴레오와 조선공학', 대한조선학회지, 56권 2호 칼럼(8), 2019년 6월.
- 4) 이승준, 노인식, <역사로 배우는 재료역학>, GS인터비전, 2015.
- 5) 이승준, 'Strength of materials의 기원', 대한조선학회지, 56권 4호 칼럼(10), 2019년 12월.
- 6) 이승준, '조선(造船) 고대사', 대한조선학회지, 55권 4호 칼럼(6), 2018년 12월 참조.
- 7) 방정식에 필수인 등호(=)가 처음 사용된 것은 Recorde(1512-1558)의 1557년 저술에서였으나, 1700년이 되어서야 등호로서 =이 서서히 사용되기 시작하였다고 볼 수 있다.
- 8) Stillman Drake, <Two New Sciences>, Wall & Emerson, Inc. 1989. 이 책은 이 글에서 인용한 <두 새로운 과학>의 영어 원본이다.
- 9) 이승준, <역사로 배우는 동역학>, GS인터비전, 2002.
- 10) 이승준, 'Dynamics의 기원', 대한조선학회지, 56권 3호 칼럼(9), 2019년 9월.
- 11) 그의 실험 노트에 따르면 경사각 1.7°의 경사면을 사용하여 중요한 실험 결과를 얻고 있었다.
- 12) 복원성과 안정성의 두 용어 모두 쓰이지만 여기서는 보다 넓은 의미가 있는 안정성을 쓰기로 한다.