

구조물의 파손과 하중 종류



[출처 : Shutterstock]

이 책의 전체 내용을 한 문장으로 요약하면 “다양한 하중하에서 응력과 변형률을 매개로 고체 구조물들의 파손을 예측해보고 이를 기반으로 안전하고 경제성 있는 구조물을 설계하기 위한 역학적 기초를 마련하는 것”이다.

이를 위해서는 우리 주변의 다양한 고체 구조물들과 일상적으로 발생하는 각종 파손에 대해 깊은 관심을 갖는 것이 중요하다고 생각한다. 첫 장의 내용은 그리 길지 않지만 고체역학을 효율적으로 탐험하는 데 있어서 유용한 길라잡이가 되었으면 한다.

1.1 구조물의 파손

우리 주변에는 수많은 **구조물들**(structures)이 존재한다. 지금 자리에서 일어나 360° 회전하면서 눈에 들어오는 고체 구조물들만 열거하더라도 손쉽게 수십 개 이상은 될 것이다. 나무 책상, 컴퓨터, 종이 컵, 안경, 콘크리트 벽, 나무 문, 나무 의자, 유리 시계, 플라스틱 스위치, 소파, 스탠드, 휴대폰, 휴지 등 이루 헤아릴 수 없이 많은 구조물들이 있을 것이다. 이러한 구조물들은 특정 **기능**(function)을 수행하도록 설계 및 제작되어 있다. 의자는 앉아 있는 사람의 무게를 안정적으로 지탱할 수 있어야 하고, 휴대폰은 어느 곳에서도 상대방과 무선으로 통화를 할 수 있어야 한다.

여행을 하면서 자주 보게 되는 [그림 1.1] (a)와 같은 이정표 지지대는 강풍과 같은 악천후 속에서도 그림에서 보이는 상태를 유지하여 운전자에게 필요한 정보를 전달할 수 있어야 한다. 사진에서 볼 수 있듯이 매우 안정적인 정적 상태를 유지하고 있다. [그림 1.1] (b)는 보행로에 설치하여 건물의 위치를 알려 주는 기능을 수행한다. 사진에서 볼 수 있듯이 강풍 등의 영향으로 인해 연직 방향에 대해 약 3°가량 기울어져 있음을 알 수 있다. 기울어진 정도를 쉽게 파악할 수 있도록 사진에 수직선을 점선으로 표시하였다. 초기 설치 후 약간의 변형이 생겼지만 본래의 기능을 수행하는 데에는 큰 문제가 없음을 알 수 있다. [그림 1.1] (c)는 고속도로 상에서의 사고로 움직일 수 없는 상태인 화물차를 보여 주고 있다. 이 화물차의 경우 수리 완료 전까지는 본연의 기능을 수행할 수 없을 것이다.

[그림 1.1]에서 (a)와 (b)의 경우는 구조물 본연의 기능을 유지하고 있으나 (c)는 당초 가지고 있던 기능을 상실한 상태이며, 이때 그 구조물은 **파손**(failure)되었다고 말한다. 인류의 역사가 시작된 이래 이러한 파손은 수없이 일어났고 앞으로도 지속적으로 발생할 것이다. 보다 다양한 파손 사례에 대해 궁금한 독자는 현대에 일어났던 역사적인 파손들의 원인과 결과를 체계적으로 정리하여 소개하고 있는 Henry Petrosky¹⁾의 책을 참조하기 바란다.

1) Henry Petrosky, *To Engineer is Human* (The Role of Failure in Successful Design), St. Martin's Press (1985).



(a) 고속도로 상에 설치된 이정표와 지지대



(b) 건물 위치 안내판



(c) 교통사고 후의 화물차

그림 1.1 다양한 구조물 및 파손 정도

1.2 고체역학의 유래

자동차를 타고 새로운 곳을 찾아가기 위해서는 정확한 목적지 주소를 내비게이션 시스템에 입력한 후 가장 최적화된 길을 찾아 운전을 시작하는 것이 바람직하다. 마찬가지로 새로운 학문을 효과적으로 학습하기 위해서는 그 학문의 학습 목적을 파악한 뒤 그 목적을 달성하기 위해 필요한 사항들을 체계적으로 학습해 나가는 것이 좋다. “내가 이 과목을 왜 들어야 하는가?”, “이 과목은 실제로 어디에 활용될까?”, “이 과목에서 배운 내용들을 실제 구조물에 적용하기 위해서는 무엇이 필요할까?”와 같은 질문들을 계속해서 자문하거나 주변 학습자들과 토론하는 것이다. 이러한 맥락에서 고체역학의 유래에 대해 먼저 살펴보기로 하자.

인류 문명이 시작된 이래 사람들은 공동체 생활을 시작했고, 이 과정에서 마을과 도시가 생겨나게 되었으며, 이들 사이의 원활한 물물교환과 교역을 위해 도로와 교량 등의 기반 시설들이 필요하게 되었다. 이를 체계적으로 연구하기 시작한 학문이 **도시 공학**(urban engineering) 또는 **토목 공학**(civil engineering)이었으며, 토목공학에서 가장 많이 사용되는 고체 재료들에 대한 거동을 다룬 학문이 바로 **재료역학**(mechanics of materials)²⁾³⁾이었다. 그러나 ‘재료’의 종류가 광범위한 관계로 이를 좀 더 구체적으로 명시한 ‘고체재료역학’을 거쳐 **고체역학**(solid mechanics or mechanics of solid)으로 자리 잡게 되었다. 따라서 이 책에서도 고체역학의 명칭을 사용하기로 한다.

1.3 고체역학을 이용한 구조물 설계

1638년 이탈리아의 과학자 갈릴레오 갈릴레이는 [그림 1.2]⁴⁾와 같이 사각 단면을 갖는 나무 재료로 제작한 구조물⁵⁾의 끝단에 돌로 만든 추를 연결해 구조물의 단면 형상(폭, 높이), 길이 및 무게와 파손과의 관계를 연구하였다. 이를 통해 얻은 결과들을 바탕으로 동일한 종류의

2) Stephen P. Timoshenko, *History of Strength of Materials*, McGraw-Hill (1953).

3) James M. Gere and Stephen P. Timoshenko, *Mechanics of Materials*, Wadsworth Publishing Co Inc (1984).

4) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Discorsi_Festigkeitsdiskussion.jpg

5) 이러한 구조물을 **외팔보**(cantilever)라 하며, 이에 대한 상세한 설명은 제7장에서 다룰 것이다.

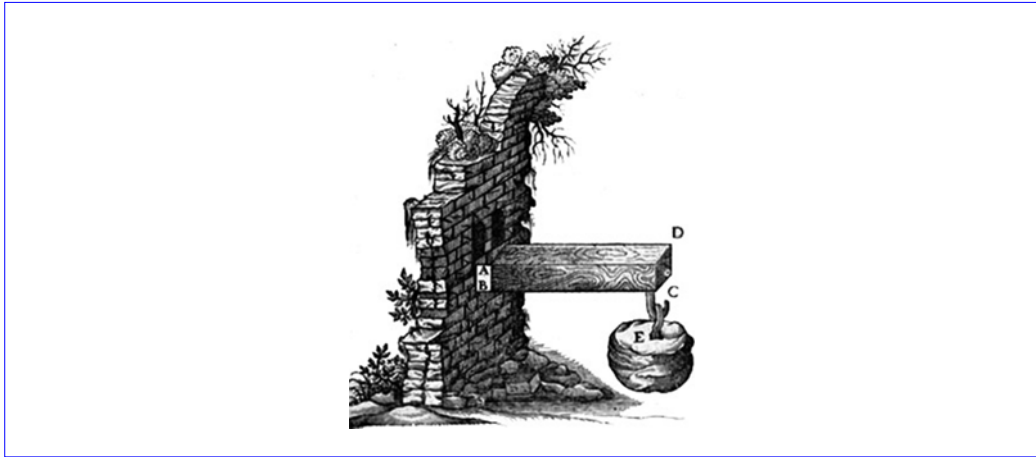


그림 1.2 갈릴레오의 외팔보[출처 : Wikimedia]

나무를 이용한 교량과 건축물들의 설계에 활용하였을 것으로 추측된다. 즉 기본 재료의 **기계적 거동**(mechanical behavior)을 파악한 뒤, 이를 바탕으로 구조물들이 실제 사용 환경에서 파손 없이 제 기능을 수행할 수 있도록 **설계**(design)하는 데 활용하였을 것이다.

1.4 구조물의 파손을 야기할 수 있는 하중

구조물은 왜 파손될까? 만약 [그림 1.3] (a)와 같은 어린이 전용 그네를 어른이 이용하면 그네 줄이 끊어지든지 그네를 지탱하고 있는 구조물이 휘거나 파손될 것이다. 그럼 어른이 타도 문제없는 그네를 설치하기 위해서는 어떤 과정을 거쳐야 할까? 먼저 그네를 이용하는 사람의 최대 몸무게와 그네 자체의 **자중**(dead weight)을 알아야 할 것이다. 우리는 이를 **하중**(loading)이라고 부른다. 즉 고체역학에서 다루는 하중이란 어떤 구조물에 변형을 일으키고 잘못 설계된 경우에는 파손에 이르게 하는 원인이라고 할 수 있다. PET⁶⁾ 음료수 용기에 뜨거운 물을 부으면 형태가 심하게 변화되는 것을 알 수 있다. 이 경우에 용기를 파손에 이르게 한 하중은 **열 하중**(thermal load)이다. 이와 같이 구조물을 파손에 이르게 하는 원인은 매우 다양하다.

6) PolyEthylene Terephthalate : 음료수 병 등의 제조에 쓰이는 합성수지



그림 1.3 축 하중 구조물 예[출처 : (a) Shutterstock]

수많은 하중 중에서 우리는 크게 네 가지 하중만을 다루기로 한다.

[그림 1.3]의 그네 줄이나 타워 크레인 케이블과 같이 구조물의 길이 방향으로 하중이 작용할 때를 **축 하중(axial loading)**이라고 한다. 그네 줄, 배의 닻줄, 현수교 케이블, 전선 케이블, 줄다리기 줄 등 축 하중을 받는 구조물의 종류는 다양하다. 축 하중은 구조물의 길이가 늘어나는 방향으로 작용하는 **인장(tensile)**축 하중과 건물의 기둥과 같이 길이가 감소하는 방향으로 작용하는 **압축(compressive)**축 하중으로 분류할 수 있다. [그림 1.3]의 케이블들은 인장 축 하중을 받고 있는 경우이다.

다음으로 [그림 1.2]의 외팔보나 [그림 1.3]의 타워 크레인 보 등은 주로 구조물의 길이 방향에 수직으로 하중이 작용하여 하중 작용 방향으로 처짐(또는 휨)이 발생하게 되는데, 이러한 경우를 **굽힘 하중(flexural/bending loading)**이라고 한다. [그림 1.4] (a)에서 나뭇가지의 자중으로 인해 나무뿌리에는 상당한 크기의 굽힘 하중이 작용된다. 이대로 방치할 경우 나무뿌리가 파손될 수 있어 나무 중간에 수직으로 버팀목을 댄 것을 알 수 있다. 이 경우 버팀목은 압축축 하중을 받게 된다.⁷⁾ 또한 도로 위 신호등을 지지하는 구조물도 신호등의 무게로 인해 굽힘

7) 구조물의 길이 방향으로 압축 하중이 작용하는 구조물을 **기둥(column)**이라고 부른다. 이 책에서는 기둥에 관한 설명은 생략한다.



(a) 기울어져 있는 나무와 버팀목



(b) 길거리 신호등 지지대

그림 1.4 굽힘 하중 구조물 예

하중을 받게 된다. 이를 보완하기 위해 케이블로 지지하고 있는 것을 알 수 있다. 이때 케이블은 인장축 하중을 받게 된다.

[그림 1.5]에서와 같이 철판을 절단하거나 전지가위로 과일나무의 가지를 전지할 때와 같이 2개의 면이 미끄러지듯이 잘리는 경우 **전단 하중**(shear loading)이 작용한다고 한다. 실제로 [그림 1.2]~[그림 1.4]의 경우에도 전단 하중이 작용하고 있다. 이에 대해서는 제7장에서 보다 자세히 다룰 것이다. 모터나 엔진 등에 의해 발생된 동력을 거리가 떨어진 곳에 전달하기



(a) 유압 전단기를 이용한 철판 절단



(b) 전지가위를 이용한 나뭇가지 정리

그림 1.5 전단 하중 구조물 예[출처 : Shutterstock]

위해 사용하는 추진축(propeller shaft)이나 구동축(drive shaft)의 경우는 빨래의 물기를 제거하기 위해 비틀 때와 동일한 하중이 작용되며, 이를 **비틀림 하중**(torsional loading)이라고 한다. 그러나 비틀림 하중은 전단 하중의 특수한 예로 보면 되기 때문에 별도의 하중으로 분류하지 않는다.

마지막으로 보일러, 각종 엔진, 터빈 등과 같은 구조물들의 경우 앞서 언급한 기계적 하중들보다 온도 변화로 인한 파손이 더 많이 발생하며, 이를 **열 하중**(thermal loading)이라고 한다.

1.5 고체 재료의 종류

고체역학에서 다루야 하거나 다룰 수 있는 문제들은 실로 방대하다. 그 이유 중의 하나는 고체 재료의 종류가 매우 다양하기 때문이다. 고체 재료들을 분류하는 방법은 다양하지만 제조 방법과 재료의 특성에 따라 **금속**(metals), **세라믹**(ceramics), **중합체**(polymers), 그리고 이들 재료들을 조합하여 만든 **복합재료**(composite materials)로 나눌 수 있으며, 각각의 경우에 대해 대표적인 예를 [그림 1.6]에 나타내었으며, 일반적인 분류법에 따른 고체 재료의 예를 [표 1.1]에 정리하였다. 하지만 동일한 재료라고 하더라도 제조 방법에 따라 매우 다른 거동을 보인다. 예를 들어, 동일한 강 재료라고 하더라도 구성 성분(철, 탄소, 황 등) 차이, 열처리 방법 및 사용 환경(고온, 저온, 수소) 등에 따라 완전히 다른 재료가 된다. 각각의 재료의 특성이나 물성값 등에 대한 간략한 설명은 제5장에서 다루겠지만, 보다 자세한 사항들은 **재료공학**(materials science/engineering) 관련 참고문헌들을 참조하기 바란다.

1.6 강체역학과 고체역학

고체역학은 일반적으로 강체역학에서 출발한다. 어떤 물체에 하중을 가하였을 때 그 물체 내에 있는 임의의 두 점의 거리가 변하지 않을 경우, 즉 변형이 일어나지 않을 때, 그 물체를 **강체**(rigid body)라고 부른다. 이러한 물체는 가상의 개념으로서 실제로는 존재하지 않는다.



그림 1.6 네 가지 재료 종류 및 예[출처 : Shutterstock]

그러나 강체의 개념은 역학을 효과적으로 학습하는 데 있어서 매우 유용하다. [그림 1.7] (a)에서와 같이 다이아몬드 커터를 이용해 유리를 자를 때, 다이아몬드 재료는 유리에 비해 강체로 간주할 수 있고, (b)에서와 같이 각종 금속을 다이아몬드 압입자(indenter)를 이용해 누를 때,

표 1.1 고체 재료의 종류

대분류	예
금속	철(iron), 강(steel), 알루미늄(aluminum), 니켈(nickel)
세라믹	실리콘(silicon), 유리(glass), 도자기(porcelain)
고분자	플라스틱(plastics), PET, 아크릴(PMMA), 폼(foam), 베이클라이트(bakelite)
생체	뼈(bone), 조직(tissue), 세포(cell)
복합재료	탄소섬유강화플라스틱(carbon fiber-reinforced plastics, CFRP), 유리섬유강화플라스틱(glass FRP, GFRP), Polyetheretherketone(PEEK)



(a) 다이아몬드와 유리



(b) 다이아몬드와 금속

그림 1.7 다이아몬드 커터를 이용한 유리 절단(a)과 다이아몬드 압입자를 이용한 금속 경도 시험(b)
[출처 : Shutterstock]

다이아몬드 재료를 금속에 비해 강체로 간주할 수 있다. 이와 같은 상대적인 강체 개념을 사용함으로써 각종 공학 해석이나 설계를 쉽게 할 수 있다. 모든 물체를 강체로 간주했을 때 그 물체에 일어나는 역학적 거동을 연구하는 학문을 **강체역학**(rigid body mechanics)이라고 한다.

강체역학은 크게 정역학과 동역학으로 구분한다. 강체 구조물에 하중을 인가했을 때 구조물이 움직이지 않고 정적인 상태를 유지할 때의 거동을 살피는 것이 **정역학**(Statics)이며, 가속 또는 감속이 일어나면서 움직일 때의 거동을 연구하는 것이 **동역학**(Dynamics)이다. [그림 1.8의 런던교(a)의 경우 정지해 있는 것으로 간주⁸⁾할 수 있어 정역학적 관점에서 해석할 수 있으며, 우주왕복선(b)의 운동을 근사적으로 해석할 때 동역학을 활용할 수 있다. 일반적으로 고체역학은 정역학을 기반으로 많은 개념을 전개하지만 동역학적인 문제를 다룰 수도 있다. 이와 같이 동역학 문제이지만 정역학적으로 해석할 수 있을 경우 **유사 정역학**(pseudo Statics)이라고 한다. 정역학적인 개념은 고체역학 학습에 있어서 필수적이므로 제2장에서 간략하게 다룰 예정이지만, 이에 앞서 정역학에 대한 복습⁹⁾을 통해 기초를 마련할 것을 권장한다.

8) 실제 모든 구조물들은 고유진동수를 가지고 미세하게 움직이고 있으나 그의 영향이 적은 경우 정적인 구조물로 간주할 수 있다.

9) KOCW(Korea open course ware)에 등재되어 있는 ‘정역학에서 정 폐기’ 동영상 강좌 참조

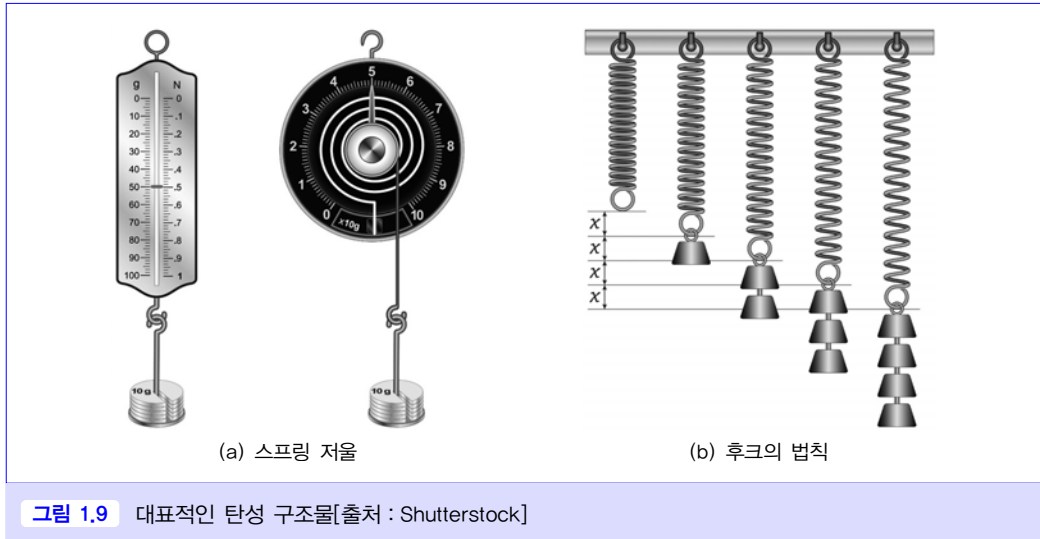


앞서 언급하였듯이 실제 강체는 존재하지 않는다. 따라서 어떤 구조물에 하중이 인가되면 변형이 생기게 되며, 이러한 거동을 살피는 학문을 고체역학이라고 한다. 따라서 고체역학을 **변형역학**(deformation mechanics)이라고도 부른다. 즉 “어떤 물체에 하중이 작용할 때 물체 내에 생기는 변형을 다루는 학문”을 고체역학이라 할 수 있다.

1.7 후크의 법칙

[그림 1.9] (a)와 같은 **스프링 저울**(spring balance)에 연직 방향으로 추를 매달면 스프링이 변형되고, 하중을 제거하면 원 상태로 복원되는 고체의 거동을 **탄성**(elastic)이라고 한다. 엔진 밸브 스프링은 대표적인 탄성 구조물이다. 1678년 R. Hooke¹⁰⁾는 [그림 1.9] (b)에서와 같이 스프링에 가해진 하중(F , 무게 또는 힘)과 변형(x) 사이에 선형적인 관계가 성립함을 실험을 통해 검증하였고, 이를 통해 $F=kx$ 의 관계식을 주장하였으며, 이를 선형 탄성 재료에 대한 **후크의 법칙**(Hooke's law)이라고 한다.

10) Robert Hooke(1635~1703) : 건축, 생물, 공학 등 다방면에 걸쳐 뛰어났던 영국의 철학자이자 과학자



1.8 고체역학 관련 학문

고체역학에서 학습한 내용만을 가지고 설계할 수 있는 실제 구조물들도 다수 존재하지만 좀 더 정확한 설계를 위해서는 고체역학을 기반으로 다음과 같은 학문들을 추가로 학습하는 것이 좋다. 각각에 대한 상세한 설명은 생략하기로 한다.

- 소성 이론(plasticity theory)
- 점탄성 이론(viscoelasticity theory)
- 점소성 이론(viscoplasticity theory)
- 접촉 역학(contact mechanics)
- 파괴 역학(fracture mechanics)
- 피로 이론(fatigue theory)
- 생체 역학(biomechanics)
- 유한요소해석(finite element analysis, FEA)
- 실험응력해석(experimental stress analysis)

1.9 고체역학 탐험 안내도

처음 방문한 여행지를 짧은 시간 내에 효과적으로 탐험하기 위해서는 [그림 1.10]과 같이 여행지에 대한 간략한 정보를 적어놓은 안내도를 잘 활용하면 된다. 먼저 여행지에 어떤 볼거리들이 있는지 파악하고, 그곳들이 어떻게 연결되어 있으며, 어느 정도의 시간이 소요될 것인지 파악하고 여행하는 것이 효율적이면서도 안전한 방법일 것이다.

고체역학을 처음 학습할 때에는 전체 내용이 어떻게 구성되어 있는지, 해당 장에서 꼭 파악해야 할 내용은 무엇인지, 그리고 핵심적인 용어나 개념은 무엇인지를 잘 생각하면서 학습하는 것이 효율적이다. 이를 위해 이 책에서 다루고 있는 내용들을 정리한 고체역학 탐험 안내도를 [그림 1.11]에 나타내었다. 이 안내도를 옆두에 두고 고체역학을 학습한다면 길을 잃지 않고 즐겁고 효율적으로 탐험할 수 있을 것이다.



그림 1.10 여행 안내도[출처 : Shutterstock]

14 ::::: 개념이 보이는 고체역학

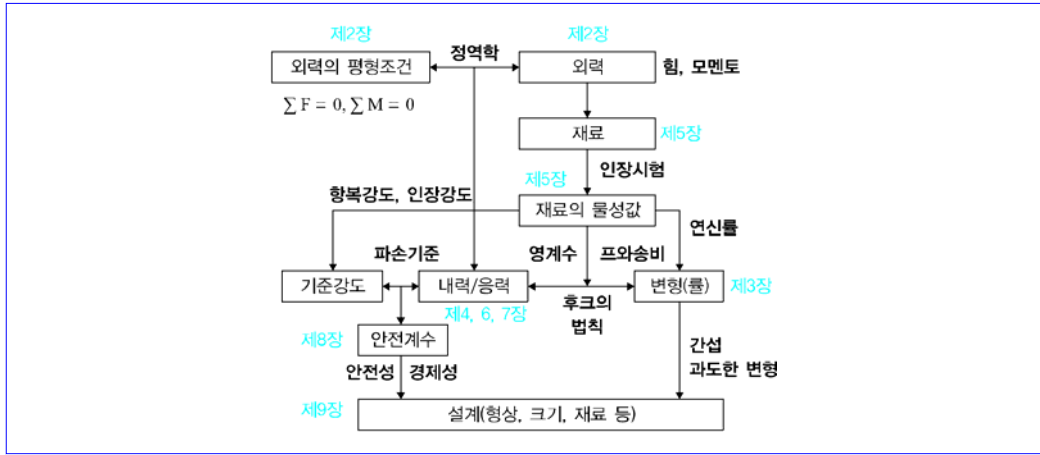


그림 1.11 고체역학 탐험 안내도