

# 예제를 통해 본 학부 기계공학 교육에서 열역학 법칙의 소개 순서에 대한 논평

박경근  
국민대학교 기계공학부

## A Comment on Presentation Order of Thermodynamic Laws for Undergraduate Mechanical-Engineering Education by Example Problems

Park, Kyoung Kuhn  
School of Mechanical Engineering, Kookmin University

### ABSTRACT

A few thermodynamics texts are commonly found to have unrealistic example problems in which the process violates the second law of thermodynamics. This error would result from presentation order in the text which introduces first the first law for cycles, systems, and control volumes and then the second law later. In the presentation order, the example problems deal only with the first law without telling whether the process violates the second law. To correct this erroneous situation, it could be recommended to present the first law and the second law successively so that both laws could be applied simultaneously to the given example problems.

**Keywords:** Thermodynamics education, Presentation order, Undergraduate thermodynamics, Violation of the second law of thermodynamics

### I. 서 론

기계공학 열역학 교재는 공학교육 과정을 구현하기 위한 교수학습 과정의 주된 자료다. 교재는 교육 내용의 양과 질을 결정하는 주된 요인이며 중요 매체다. 열역학 교재는 실제 기계공학 현장에서 효과적으로 응용할 수 있는 접근방법과 사례를 소개하는 현실적인 예제를 다루어야 하고, 산업과 사회가 필요로 하는 실력을 학습자가 갖출 수 있도록 해야 할 것이다. 그러나 학습 현장에서 쓰이는 교재에서 일부이겠지만 열역학 제2법칙을 위배하는 예제를 공통적으로 발견할 수 있다. 이러한 비현실적인 예제는 잘못된 개념과 감각, 직관 등을 학습자에게 제시할 위험성이 있다.

본 연구에서는 1) 열역학 제2법칙을 위배하는 예제의 사례를 들고, 2) 이러한 비현실적인 예제가 제시되는 원인이 내용 전개 순서와 관련되어 있는 것으로 판단하며, 3) 이를 개선할 방향을 제안하고자 한다.

### II. 사례 연구

이 장에서는 몇몇 열역학 교재에 나와 있는 일부 예제를 분석한다. 우선 Table 1에 나타난 바와 같이 실린더/피스톤 장치에서 기체를 압축하는 경우에 열전달량을 구하는 Borgnakke & Sonntag(2014, p. 107)의 예제 3.14를 살펴본다.

Table 1 Example 3.14 of Borgnakke & Sonntag(2014, p. 107)

Contents
A cylinder fitted with a piston has an initial volume of $0.1 \text{ m}^3$ and contains nitrogen at 150 kPa, $25^\circ\text{C}$ . The piston is moved, compressing the nitrogen until the pressure is 1 MPa and the temperature is $150^\circ\text{C}$ . During this compression process heat is transferred from the nitrogen, and the work done on the nitrogen is 20 kJ. Determine the amount of this heat transfer.

이 예제에 대한 열역학 제1법칙 식은 다음과 같다.

$$m(u_2 - u_1) = {}_1Q_2 - {}_1W_2 \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 질량,  $u$ 는 내부 에너지, 하첨자 1은 초기 상태를 하첨자 2는 최종 상태를 각각 나타낸다.  ${}_1Q_2$ 과  ${}_1W_2$ 는 과정 1-2에서의 열전달량과 일을 각각 나타낸다. 이상기체 식

$P_1 V_1 = mRT_1$  을 이용하여 질량을 구할 수 있다. 여기서  $P$ 는 압력,  $V$ 는 체적,  $R$ 은 기체 상수,  $T$ 는 절대 온도다. 주어진 조건을 식(1)에 대입하면  ${}_1Q_2 = (-)4.21 \text{ kJ}$  이 된다.

열역학 제2법칙 식은 다음과 같다.

$$m(s_2 - s_1) = {}_1Q_2/T_0 + {}_1S_{2gen} \quad (2)$$

여기서  $s$ 는 단위질량당 엔트로피고,  $T_0$ 는 주위 온도,  ${}_1S_{2gen}$ 은 과정 1-2에서의 생성 엔트로피다. 생성 엔트로피는 시스템의 엔트로피 변화량과 주위의 엔트로피 변화량의 합으로, 총 엔트로피 증가의 원리에 의해 항상 0과 같거나 양(+)의 값을 갖는다. 다음은 시스템의 엔트로피 변화량에 대한 식이다.

$$s_2 - s_1 = C_{P0} \ln T_2/T_1 - R \ln P_2/P_1 \quad (3)$$

여기서  $C_{P0}$ 는 이상기체 정압비열이다. 식(3)의 결과를 식(2)에 대입하고  $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 가정하면  ${}_1S_{2gen} = (-)0.0190 \text{ kJ/K}$ 가 된다. 생성 엔트로피가 음수이므로 이 과정은 제2법칙(총 엔트로피 증가의 원리)을 위배하며, 현실에서는 이루어 질 수 없다.

다음으로 Table 2에 나타낸 바와 같이 압축기로 기체를 압축하는 경우에 필요한 입력동력을 구하는 Cengel & Boles(2015, pp. 232-233)의 예제 5-6을 살펴본다.

**Table 2 Example 5-6 of Cengel & Boles(2015, pp. 232-233)**

Contents
Air at 100 kPa and 280 K is compressed steadily to 600 kPa and 400 K. The mass flow rate of the air is 0.02 kg/s, and a heat loss of 16 kJ/kg occurs during the process. Assuming the changes in kinetic and potential energies are negligible, determine the necessary power input to the compressor.

이 예제에 대한 열역학 제1법칙 식은 다음과 같다.

$$h_2 - h_1 = q - w \quad (4)$$

여기서  $h$ 는 작동유체 단위질량당 엔탈피고, 하첨자 1과 2는 입구 상태와 출구 상태를 각각 나타낸다.  $q$ 와  $w$ 는 각각 단위 질량당 열과 일이다. 공기를 이상기체로 간주하고 주어진 조건을 식(4)에 대입하면  $w = (-)136.5 \text{ kJ/kg}$  이 된다.

열역학 제2법칙 식은 다음과 같다.

$$s_2 - s_1 = q/T_0 + s_{gen} \quad (5)$$

여기서 식(3)을 이용하여  $s_2 - s_1$ 을 구하고,  $T_0 = 280 \text{ K}$ 로 가정하면 단위질량당 생성 엔트로피  $s_{gen} = (-)0.117$

kJ/kg K가 된다. 역시 생성 엔트로피가 음수이므로 이 과정 또한 제2법칙을 위배하며, 현실에서는 이루어 질 수 없다.

Moran et al.(2012, pp. 168-169)의 예제 4.5는 Cengel & Boles(2015, pp. 232-233)의 예제 5-6과 비교하면 다소 복잡하지만 근본적으로 같은 종류의 예제다. Cengel & Boles(2015, pp. 232-233)의 예제 5-6과 같은 방법으로 해석하면 Moran et al.(2012, pp. 168-169)의 예제 4.5 또한 생성 엔트로피가 음수가 되는, 제2법칙을 위배하는 비현실적인 문제임을 알 수 있다.

### III. 논의 및 고찰

앞 장에서 다룬 바와 같이 학습 현장에서 쓰이는 열역학 교재에서 일부이겠지만, 열역학 제2법칙을 위배하는 예제를 발견할 수 있다. 이러한 비현실적인 예제로 인해 학습자가 잘못된 개념과 감각, 직관 등을 습득할 위험성이 있다. 이러한 오류가 각 주요 교재(Borgnakke & Sonntag, 2014; Cengel & Boles, 2015; Moran et al., 2012)에서 공통적으로 발견되는 원인은 내용 전개 순서와 상당히 관련되어 있는 것으로 판단된다.

Table 3~6은 대표적인 학부 열역학 교재(Borgnakke & Sonntag, 2014; Cengel & Boles, 2015; Moran et al., 2012; 노승탁, 2008)에서 열역학 제1법칙과 제2법칙을 사이클, 시스템, 검사체적을 대상으로 하여 소개하는 순서(숫자 1, 2, 3 등으로 표시함)를 각각 나타낸다.

Table 3의 Borgnakke & Sonntag(2014)은 열역학 제1법칙을 사이클, 시스템, 검사체적 순서로 전부 적용한 후에 열역학 제2법칙을 비로소 제시하고 있다. Table 4의 Cengel & Boles(2015)는 Borgnakke & Sonntag(2014)의 순서와 거의 같지만, 사이클에

**Table 3 Presentation order of the laws of thermodynamics and the objects for which the laws are applied. (Borgnakke & Sonntag, 2014)**

objects \ laws	1st law	2nd law
cycle	1	4
system	2	5
control volume	3	6

**Table 4 Presentation order of the laws of thermodynamics and the objects for which the laws are applied.(Cengel & Boles, 2015)**

objects \ laws	1st law	2nd law
cycle		3
system	1	4
control volume	2	

대한 제1법칙은 거의 다루고 있지 않고 있으며, 시스템과 검사체적에 대한 제2법칙을 같은 장에서 소개하고 있다. Table 5의 Moran et al.(2012) 역시 순서는 Borgnakke & Sonntag(2014)과 거의 같다. 시스템에 대한 제1법칙을 먼저 제시한 후에 사이클에 대한 제1법칙 식을 제시하고 있다.

이와 같이 몇몇 교재에서 대체로 열역학 제1법칙을 사이클, 시스템, 검사체적의 순서로 적용한 후에 열역학 제2법칙을 소개하고 있다. 이 경우에, 예를 들어 검사체적에 대한 열역학 제1법칙을 다룬 후에 다시 검사체적에 대한 열역학 제2법칙을 소개하기까지는 (다른 내용을 중간에 소개하므로) 상당한 기간이 필요하게 된다. 따라서 검사체적에 대한 열역학 제1법칙과 관련된 예제를 다루는 시점에서는 제2법칙을 적용할 수 없으므로 해당 예제가 제2법칙을 만족하고 있는지 여부를 전혀 판단할 수 없다. 이것이 일부 예제가 열역학 제2법칙을 위배하는 비현실적인 내용으로 구성되는 이유일 것이다.

예제의 과정이 제2법칙을 위배하는가를 파악하는 다른 방법으로는 엑서지 해석을 통한 2법칙 효율 계산이 있다. 그러나 엑서지 해석은 대부분의 교재에서 열역학 제1법칙과 제2법칙을 전부 다룬 후에 소개하고 있으며 이를 중간에 적용하는 것은 현실적으로 전혀 불가능하다.

Table 6은 노승탁(2008)의 순서를 나타낸다. 중요한 특징으로는 검사체적과 관련된 부분이 후반부에 제시되며 검사체적에 대한 제1법칙과 제2법칙이 연이어 소개되고 있어 제1법칙을 다룬 후에 즉시 제2법칙을 다루고 있다는 것이다. 이는 최소한 검사체적에 대한 내용을 다룰 때 제1법칙과 제2법칙을 연이어 소개하는 것이 가능함을 나타낸다.

**Table 5 Presentation order of the laws of thermodynamics and the objects for which the laws are applied.(Moran et al., 2012)**

objects \ laws	1st law	2nd law
cycle	2	4
system	1	5
control volume	3	6

**Table 6 Presentation order of the laws of thermodynamics and the objects for which the laws are applied.(Roh, 2008)**

objects \ laws	1st law	2nd law
cycle	1	2
system		3
control volume	4	5

제2법칙을 위배하는 예제가 제시되지 않도록 하는 개선 방법으로, Table 7에 나타난 바와 같이, 열역학 제1법칙과 제2법칙을 바로 연이어 학습하는 방법을 제안하고자 한다. 즉, 사이클에 대한 열역학 제1법칙과 제2법칙을 연이어 설명하고, 시스템에 대한 열역학 제1법칙과 제2법칙을 소개하며, 마지막으로 검사체적에 대한 열역학 제1법칙과 제2법칙을 다루는 것이다. 이렇게 하면 주어진 사이클 또는 과정이 열역학 제1법칙뿐만 아니라 열역학 제2법칙도 동시에 따르고 있는지 여부를 즉시 확인할 수 있으므로, 비현실적인 예제를 제시하는 오류를 원천적으로 피할 수 있을 것이다.

**Table 7 Presentation order of the laws of thermodynamics and the objects for which the laws are applied as suggested by this work**

objects \ laws	1st law	2nd law
cycle	1	2
system	3	4
control volume	5	6

교육현장에서 어떤 내용을 어떤 순서로 어떻게 학습할 것인가는 저자와 교강사 나름대로의 견해에 바탕을 두고 결정해야 할 것이다. 그러나 기계공학 열역학을 전공한, 각 교재의 저자와 교강사가 본 원고에서 지적하는 공통적인 오류의 발생 가능성을 인지하지 못한다면 그것은 지속적으로 문제가 될 수 있을 것이다. 특히, 인용한 참고문헌들은 7판(Moran et al., 2012) 내지 8판(Borgnakke & Sonntag, 2014; Cengel & Boles, 2015)까지 개정되고 사용되어온 공학교육 교재이므로, 해당 오류가 장기간에 걸쳐 전혀 인지되지 못하였음을 나타내고 있다. 또한, 저자의 지식 범위에서는 오류의 원인이 학습 순서나 교재 구성의 잘못일 수 있음을 지적하는 연구 결과 또한 찾지 못하였다.

열역학 이론에 의하면, 열역학 제1법칙과 제2법칙을 모두 만족하는 과정만이 실제로 일어날 수 있다. 이 이론을 내용 소개의 순서에도 충실히 반영해야 할 것이며, 그렇게 되도록 교안을 구성하는 것이 공학교육의 학습목적상 효과적이며 바람직할 것이다.

#### IV. 결론 및 제언

몇몇 학부 열역학 교재에 열역학 제2법칙을 위배하는 비현실적인 예제가 공통적으로 있음을 파악하였다. 이러한 오류의 원인은 열역학 제1법칙을 사이클, 시스템, 검사체적의 순서로 적용하는 것을 완료한 후에야 비로소 열역학 제2법칙을 설명하

기 때문으로 생각된다. 이 경우에 열역학 제1법칙과 관련된 예제를 다루는 시점에서는 제2법칙을 적용할 수 없으므로 그 예제가 제2법칙을 만족하고 있는지 여부를 판단하지 않게 된다. 오류를 개선하는 방법으로 열역학 제1법칙과 제2법칙을 바로 연달아 학습하는 것을 추천하고자 한다. 학습 순서를 이렇게 하는 것이 비현실적인 예제를 제시하지 않는 원천적인 방법이 될 수 있을 것이다.

### 참고문헌

1. Borgnakke, C. & Sonntag, R. E.(2014). *Fundamentals of Thermodynamics* (8th Ed., SI Version). Singapore: John Wiley & Sons.

2. Cengel, Y. A. & Boles, M. A.(2015). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (8th Ed.). New York: McGraw-Hill.
3. Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D. & Bailey, M. B.(2012). *Principles of Engineering Thermodynamics* (7th Ed., SI Version). Hoboken: John Wiley & Sons.
4. 노승탁(2008). 최신 공업열역학(4판). 문운당.



**박경근 (Park, Kyoung Kuhn)**

1993년: The University of Michigan, Ann Arbor 공학박사

1993년~현재: 국민대학교 기계공학부 교수

관심분야: 공학교육, 열공학

E-mail: pkk@kookmin.ac.kr