

두 이상기체 단순계로 구성된 복합계의 열역학적 거동

정 평 석* · 조 경 철**

(1997년 10월 29일 접수)

Thermodynamic Behavior of the Composite System Composed of Two Simple Ideal Gas Systems

Pyung Suk Jung and Kyung Chul Cho

Key Words: Potential Work(잠재일), Available Work(가용일), Composite System(복합계), Simple System(단순계), Ideal Gas(이상기체)

Abstract

The potential work is defined as the maximum available work extractable from a composite system. It is important concept to understand the behavior of a composite system because it is a property of the composite system and shows the possible room for the system to change its state by itself. To explain this concept quantitatively, the behavior of a composite system composed of two simple ideal gas systems is analyzed. The potential work of the composite system is estimated, the various reversible processes from a given state to the equilibrium state and the processes on which potential works are constant are shown on the T-P and S-V planes. Such an effort will be necessary to understand the characteristics of composite systems as well as helpful for a deeper comprehension of the energy conversion principles.

기호설명	하첨자
C_p : 정압비열	o : 대기상태
C_v : 정적비열	1, 2 : 상태
E : 엑서지	A, B : 단순계
m : 질량	e : 평형상태
P : 압력	ex : 방출
R : 기체상수	T : 전체
S : 엔트로피	tr : 이동
T : 온도	
U : 내부에너지	
V : 체적	
W : 일	
Φ : 잠재일	

1. 서 론

주어진 열원으로부터 기계적 일을 추출하기 위하여서는 열기관이라는 에너지 변환장치를 이용하게 된다. 그러나 열역학 제2법칙에 의하면 하나만의 열원으로부터는 기계적 일을 추출할 수 없으며 이를 위하여서는 반드시 온도나 압력이 서로 다른 두

*회원, 영남대 기계공학부
**영남대 대학원 기계공학부

개 이상의 열원이 필요하다. 또한 유한한 열원들로부터 추출할 수 있는 최대의 기계적 일은, 유한하고 유일한 값을 가지며 일을 추출하는 과정에 무관하므로 주어진 열원의 상태량으로서 이것을 잠재일이라 한다.⁽¹⁻³⁾ 따라서 주어진 열원의 잠재일을 계산하고, 외부로 기계적 일을 추출함에 따른 열원의 상태변화 과정을 추적해 보는 것은 에너지 변환의 원리와 한계 등을 이해하는 지름길이 되므로 공학적으로 중요한 의미가 있다. 특히 추출 가능한 최대일의 한계는 실제로 사용하는 열기관의 구조나 작동방법 등과는 무관하게 결정되므로, 임의로 과정을 선택하고 그 과정의 진행상황 등을 도표 상에 표시할 수 있으며, 비가역성에 대하여서도 일반적인 영향을 고찰할 수 있다. 이러한 개념은, 열역학 제2법칙적 해석의 지배량으로 등장하는 엑서지 또는 가용에너지로부터 진일보한 개념이라 할 수 있다. 즉, 대기와 열원을 하나의 조합으로 하여 그로부터 추출 가능한 최대의 기계적 일을 열원의 가용 에너지 또는 엑서지라 하며, 이것을 목적량으로 하여 에너지 변환장치 등의 성능을 평가해석하는 일련의 작업을 열역학 제2법칙적 해석이라 하고 근래에는 학부의 열역학 교과서에도 하나의 장으로 삽입되고 있다. 그러나 잠재일은 여기서 한 걸음 더 나아가 유한한 두 열원들로부터 추출 가능한 기계적 일을 의미하며 이에 관한 연구는 비교적 근래에 몇몇 학자에 의하여 제기되고 있으나, 개념적 혼란과 엑서지 개념의 공학적 성공에 밀려 주목받지 못하고 있는 형편이다. 그러나 이러한 가용 에너지 개념의 일반화는 에너지 변환과정의 심도 있는 이해를 위하여서는 반드시 필요한 사항으로서, 단편적으로는 열역학 교재에 예제 등의 형태로 자주 나타나고 있다.⁽⁴⁻⁸⁾ 따라서 본 연구에서는 이와 관련한 개념 설명을 위하여 하나의 체계적 계산례를 보이고자 한다. 즉, 두 개의 단순 이상기체로 구성된 복합계를 예로 들어 여기서 추출할 수 있는 최대의 기계적 일 즉 잠재일을 계산하기 위한 식을 유도하고, 기계적 일이 방출되는 과정의 표시 및 이에 따른 잠재일의 감소 등을 고찰하고자 한다. 여기서 기계적 일이란 중력장 속에서의 위치 에너지 변화와의 증가로서 설명되고 있으며, 그 외에도 축을 통하여 전달되는 일 또는 전기적 일 등이 있다. 그러나 단순히 체적팽창으로 인한 일 등은 기계적 일에서 제외하여야 하므로 주의하는데 이러한 에너지의 가용성 여부는 교과서에서 조차도

개념상의 혼란을 보이고 있는데 이는 곧 아직도 이와 연관된 이론이 완전히 정립되지 않았음을 의미한다.⁽¹⁾ 이러한 혼란을 줄이고 추출일의 형태에 대한 제한을 피하기 위하여 본 서술에서는 ‘가용일’이라는 용어를 사용하기로 하며, 주로 가용일의 방출에 따른 복합계의 상태변화와 잠재일의 감소 등을 고찰해 보기로 한다.

2. 복합계의 잠재일

Fig. 1과 같이 질량이 1이고 온도와 압력이 각각 T_A, P_A, T_B, P_B 이며 비열이 각각 C_A, C_B 이며 기체상수가 각각 R_A, R_B 인 두 단순 이상기체계 A, B가 상호작용하는 상황을 생각하자. 가역과정을 통하여 이 상호작용으로부터 방출되는 가용일은 소계간의 엔트로피 이동에 의한 가용일과 체적 이동에 의한 가용일의 합으로서 다음이 된다. 여기서 체적이동이란, 두 계 사이에 이동 가능한 피스톤이 설치되어 있어서 한 계의 체적이 감소한 만큼 다른 계의 체적이 증가하는 현상을 의미한다.

$$\delta W_{ex} = (T_A - T_B) \delta S_{tr} + (P_A - P_B) \delta V_{tr} \quad (1)$$

그런데, 가역과정에서 엔트로피와 체적은 각각 보존되므로

$$\delta S_{tr} = -dS_A = dS_B \quad (2.1)$$

$$\delta V_{tr} = -dV_A = dV_B \quad (2.2)$$

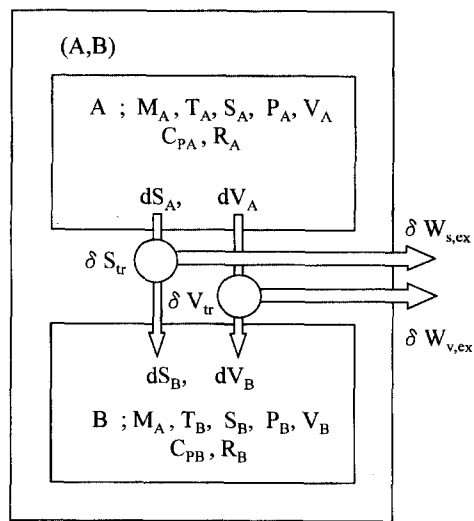


Fig. 1 A composite system composed of two simple compressible subsystems.

로 표시할 수 있고 이들을 대입하면 가용일 방출은 다음이 된다.

$$\begin{aligned} \delta W_{ex} &= -(T_A dS_A + T_B dS_B) + (P_A dV_A + P_B dV_B) \\ &= -(dU_A + dU_B) = -dU_T \end{aligned} \quad (3)$$

이것은, 한 단열계로부터 방출되는 일은 그 계의 내부에너지 감소량과 같다는 열역학 제1법칙과, 최대의 일은 가역과정을 통하여 방출된다는 열역학 제2법칙의 당연한 귀결이다.

여기서 상호작용하는 두 단순계를 동시에 포함하는 복합계를 설정하면, 체적과 엔트로피가 외부로 출입할 수 없는 고립 복합계로부터 추출할 수 있는 최대의 가용일은 유일한 값을 가지며 복합계의 주어진 상태에 따라 결정되는 상태함수로서 잠재일이라 한다.⁽¹⁻³⁾ 즉 복합계의 잠재일은 최초상태에서의 내부에너지와, 가역과정을 통하여 도달되는 평형상태에서의 내부에너지의 차이이고 이상기체의 경우 내부에너지는 온도만의 함수이므로 비열이 일정한 경우

$$\begin{aligned} \Phi &= (U_A + U_B) - (U_{Ae} + U_{Be}) = C_{VA}(T_A + T_e) \\ &\quad + C_{VB}(T_B + T_e) \end{aligned} \quad (4)$$

이 된다. 따라서 복합계의 잠재일의 계산은 단순히 가역적으로 도달하는 평형상태의 온도를 구하여 대입하기만 하면 된다. 이것은 잠재일이 상태량으로서 과정의 경로에 무관하다는 특성에 의하여 가능하다. 이제 임의의 상태에서 출발하여 가역적으로 도달하는 평형상태를 구해 보자.

체적은 과정의 가역성 여부에 관계 없이 보존되며, 가역과정에서는 엔트로피도 보존되므로

$$S_{Ae} + S_{Be} = S_A + S_B = S_T = \text{constant} \quad (5.1)$$

$$V_{Ae} + V_{Be} = V_A + V_B = V_T = \text{constant} \quad (5.2)$$

이 성립하고, 여기에 열용량이 일정한 경우의 엔트로피 계산식과 이상기체 방정식

$$S_e - S = C_p \ln \left(\frac{T_e}{T} \right) - R \ln \left(\frac{P_e}{P} \right) \quad (6)$$

$$V = \frac{RT}{P} \quad (7)$$

와 평형조건

$$T_A = T_B = T_e \quad (8.1)$$

$$P_A = P_B = P_e \quad (8.2)$$

을 대입하여 정리하면

$$P_e = \frac{(R_A + R_B) T_e}{V_T} = \frac{R_T T_e}{V_T} \quad (9)$$

$$T_e = \left\{ \frac{(T_A^{C_{PA}} T_B^{C_{PB}}) \left(\frac{R_T}{V_T} \right)^{R_T}}{(P_A^{R_A} P_B^{R_B})} \right\}^{\left(\frac{1}{C_{VT}} \right)} \quad (10)$$

가 된다. 따라서 임의의 상태의 복합계의 잠재일은 식 (4)에 평형온도 계산식 (10)을 대입하면 두 소계 각각의 온도 및 압력의 함수로서 간단히 계산된다.

이러한 두 개의 단순 압축성 소계로 구성된 복합계의 상태표시는 독립변수의 수가 네 개이므로 일반적인 경우의 잠재일을 평면상의 그림으로 나타낼 수는 없다. 그러나 하나의 소계의 초기상태가 주어진 경우를 생각하면 나머지 소계의 초기상태를 표시하는 두 개만의 독립변수에 대하여 삼차원 그림 또는 잠재일이 일정한 곡선 등의 형태로 잠재일을 표시할 수 있으며 아래와 같은 경우에 대하여 계산을 수행해 보자.

<계산조건>

$$T_{B1} = 300\text{K}, P_{B1} = 100\text{kPa}$$

$$T_{A1} = 0 - 700\text{K}, P_{A1} = 0 - 500\text{kPa}$$

$$m_{A1} = 1\text{kg}, m_{B1} = 1\text{kg}$$

$$C_p = 1\text{kJ/kgK}, R = 0.287\text{kJ/kgK}$$

즉, 두 단순계 공히 질량은 1(kg), 정압비열 C_p 는 1(kJ/kgK), 기체상수 R 은 0.287(kJ/kgK)이고, 단순계 B의 최초 온도와 압력이 300(K), 100(kPa)일 때, 단순계 A의 초기상태에 따른 복합계의 잠재일을 계산한 결과는 다음과 같다.

먼저, 단순계 A의 초기 온도와 압력을 변수로 하여 잠재일을 계산해 보면 Fig. 2와 같이 나타난다. 그림에서, 두 단순계의 압력과 온도가 모두 같을 때 잠재일은 0이며, 온도나 압력 중 어느 것 하나라도 다르다면 항상 양의 값을 가지게 된다. 한 단순계의 온도나 압력이 0으로 접근하면 잠재일은 무한히 증가하게 되는데 이것은 엔트로피가 음의 무한대 또는 체적이 무한대인 단순계의 경우가 되기 때문이다.

Fig. 3은 Fig. 2의 잠재일을 $S_A - V_A$ 평면상에 그린 것이다. 그림에서 체적과 온도가 모두 같을 때 잠재일이 0이 되나 이것은 두 단순계가 동일한 경우의 계산이기 때문이다. 그리고 한 단순계의 체적이 0인 경우 압력이 무한대가 되므로 잠재일도 무한대가 된다. 그러나 엔트로피는 기준상태에 대한

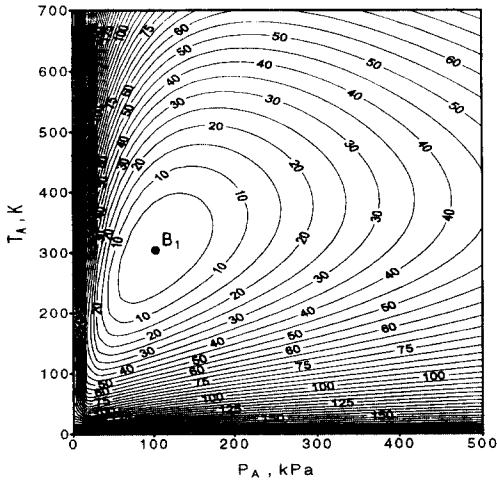


Fig. 2 Potential work as function of TA1 and PA1 with given TB1 and PB1.

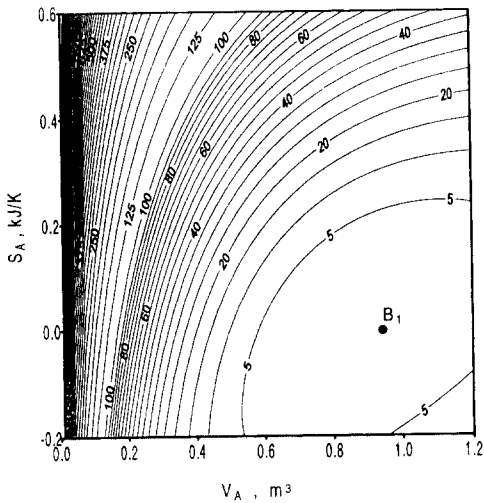


Fig. 3 Potential work as function of SA1 and VA1 with given SB1 and VB1.

상대적인 값을 표시하므로 음과 양의 전 영역에 걸쳐서 잠재일이 존재하게 된다.

여기서, 단순계 B의 용량이 무한히 큰 경우를 생각해 보자. 이 때의 잠재일은 주어진 단순계와 무한용량계로 구성된 복합계로부터 추출할 수 있는 최대의 가용일로서, 잠재일은 단순계 A의 엑서지가 된다. 이 때의 잠재일 즉 엑서지가 0이 되는 평형상태는 바로 단순계의 상태가 무한용량계의 온도와 압력이 될 때이고, 임의의 두 단순계의 엑서지는 각각의 단순계의 엑서지의 합이 되므로 계산이

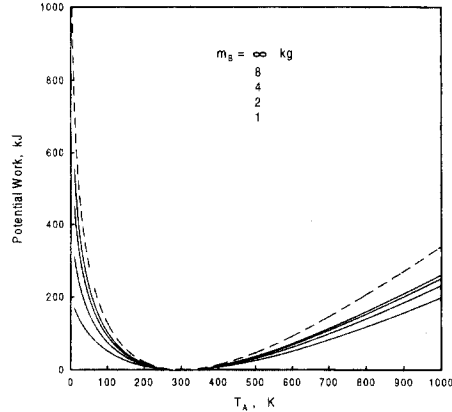


Fig. 4 Change of potential work as the capacity of a subsystem increases.

간단하게 된다. 따라서 잠재일은 엑서지 개념을 기준계의 열용량이 유한한 경우에 대하여 일반화한 것이라 할 수 있다. 이 때 무한용량계의 온도와 압력은 가용일 방출과정에서 변하지 않으므로 가용일 방출은 식 (3)에서

$$\begin{aligned} \delta W &= -(T_A - T_0) dS_A + (P_A - P_0) dV_A \\ &= -dU_A + T_0 dS_A - P_0 dV_A \end{aligned} \quad (11)$$

이 되고 엑서지의 계산식은 다음이 된다.

$$\begin{aligned} E &= (U_A - U_{Ae}) - T_0(S_A - S_{Ae}) + P_0(V_A - V_{Ae}) \\ &= C_{VA}(T_A - T_0) - T_0 \left[C_{PA} \ln \left(\frac{T_A}{T_0} \right) \right. \\ &\quad \left. - R_A \ln \left(\frac{P_A}{P_0} \right) \right] + P_0 R_A \left(\frac{T_A}{P_A} - \frac{T_0}{P_0} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

또한 무한용량계의 온도가 0(K), 압력이 0(kPa)이면 가용일 방출은 식 (3)에서

$$\delta W = -(T_A - 0) dS_A + (P_A - 0) dV_A = -dU_A \quad (13)$$

이므로 이경우의 엑서지는

$$E = (U_A - U_{A0}) = C_{VA} T_A \quad (14)$$

로서 곧 한 단순계의 내부에너지가 된다. 여기서 잠재일의 특수한 경우가 엑서지이고, 엑서지의 특수한 경우가 내부에너지라는 논리가 성립하며, 이것은 기존의 열역학에서의 설명순서와 정반대인 점이 흥미롭다. Fig. 4는 한 단순계의 열용량이 증가함에 따라 복합계의 잠재일이 변하는 모양을 표시하며, 열용량이 무한대가 될 때에는 엑서지가 되는 것을 보여준다. 또, Fig. 5는 엑서지의 경우, 무한

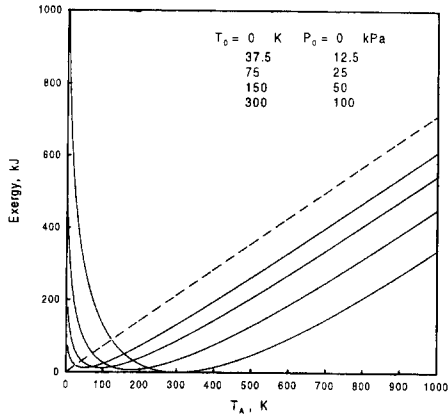


Fig. 5 Change of exergy as the temperature and pressure of the huge subsystem decrease.

용량계의 온도와 압력이 낮아짐에 따른 엑서지의 변화로서 온도와 압력이 0(K), 0(kPa)일 때 내부 에너지가 되는 것을 보여주고 있다. 그림에서 대상계의 압력은 100(kPa)로서 일정한 경우이므로 기준계의 압력이 낮아짐에 따라 엑서지의 최소값이 0이 아닌 유한한 값이 된다.

3. 복합계의 상태변화 과정의 표시

3.1 가용일 방출과정

질량이 일정한 두 개의 단순 압축성계로 구성된 복합계에서, 두 소계는 각각 두 개씩의 독립변수를 가지므로 복합계의 상태변화를 표시하기 위하여서는 네 개의 독립변수가 필요하다. 이것은 각각의 소계에 엔트로피와 체적이 독립적으로 출입하여 각 소계의 상태량으로서의 엔트로피와 체적이 독립적으로 변하고 이에 따라 온도, 압력 등이 변할 수 있음을 뜻한다. 그러나 복합계의 경계의 성질에 제한이 주어지면 상태변화도 제한되게 되는데 가용일만이 출입 가능하고 체적이나 엔트로피는 출입할 수 없는 고립복합계의 경우, 한 소계의 체적과 엔트로피가 주어지면 다른 소계의 엔트로피와 체적도 결정되며 따라서 독립변수의 수는 두 개로 줄어 들고, 여러가지 이차원 평면상에 복합계의 상태변화 과정을 표시할 수 있다. 이러한 과정의 진행에 따른 복합계의 상태변화와 가용일의 방출상황 등을 알아보기 위하여, 우선 복합계가 가역적으로 가용일을 방출하고 평형상태에 도달하는 몇 가지 특이한 경로를 고려해 보자.

Fig. 6과 Fig. 7은, 주어진 상태에서부터 평형상태

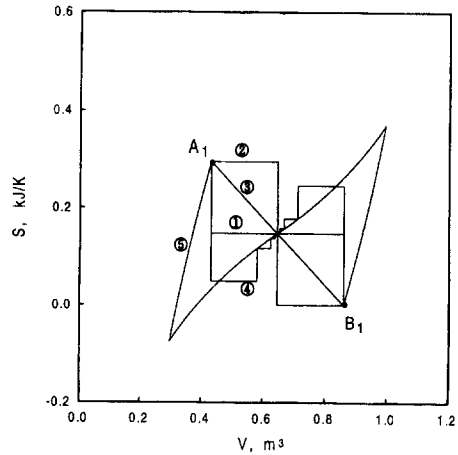


Fig. 6 Various processes from a state to equilibrium state on the S-V plane.

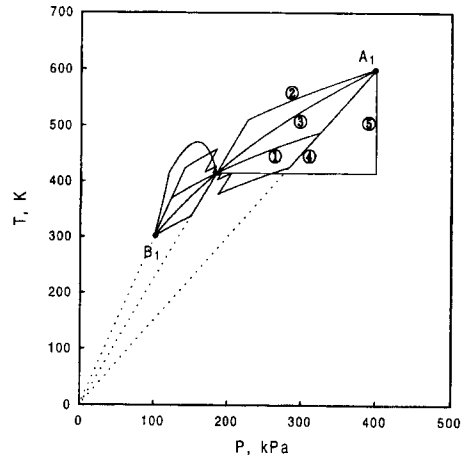


Fig. 7 Various processes from a state to equilibrium state on the T-P plane.

에 이르는 비교적 간단한 다섯가지의 가역과정들을 S-V 선도와 T-P 선도상에 표시한 것으로서, 각각의 과정은 다음과 같다.

①번 과정 : 두 단순계의 체적이 고정된 상태로 단순계 사이에 엔트로피가 이동하여 평형상태에서의 엔트로피 배분상태가 된 다음 엔트로피가 고정된 상태로 체적이 이동하여 평형상태에 도달하는 두 단계로 구성된 과정을 보여준다. 정적과정의 경우, 이상기체 방정식 $PV=RT$ 에서 온도와 압력은 단순 비례하므로 T-P 선도 상에서 직선을 연장하면 원점을 지난다.

②번 과정 : ①번 과정의 순서를 바꾼 경우로서

비슷한 경로를 보여준다.

③번 과정 : 엔트로피 이동량과 체적 이동량이 일정한 비례를 유지하면서 과정이 진행되어 초기점과 평형점을 직선으로 잇는 경우로서 하나의 독립변수로서 전체의 과정이 표시될 수 있을 것이다.

④번 과정 : 정적과정으로 두 소계의 온도가 같아질 때까지 엔트로피가 이동하면서 가용일을 방출하고 다음은 등엔트로피 상태에서 체적이 이동하여 가용일을 방출하며 등온상태에 도달한다. 이 때 두 소계의 온도가 달라지므로 앞의 두 등적과정과 등엔트로피 과정을 무수히 반복하여 평형상태에 도달하는 과정으로서 방출되는 가용일을 모두 합하면 잠재일이 될 것이다.

⑤번 과정 : 소계 A가 등압상태에서 온도가 평형상태의 온도에 도달하고 다음은 등온상태에서 압력만 변하여 평형상태에 도달하는 과정으로 이론적으로는 엔트로피 변화 등의 계산에 편리한 과정이나 물리적으로는 엔트로피와 체적이 적절히 배합되어 이동하여야 하기 때문에 실현하기 까다로운 과정으로서 복합계 전체의 체적과 엔트로피가 일정한 조건하의 과정이므로 소계 B의 과정은 등온과정이나 등압과정이 아닌 과정이 된다.

그런데 이 모든 경우는 물론 어떠한 임의의 과정을 택하더라도 방출되는 가용일의 총량은 일정하고 이것은 곧 잠재일이 상태량임을 의미하는데 역으로 이와 같이 경로에 무관한 물리량이 존재하고 그것을 잠재일로 정의한 것이라고 할 수 있을 것이다.

Fig. 6에서, 두 단순계의 성질이 동일하므로 평형점은 한 점에서 일치하고, 각 단순계의 초기상태에서 평형상태점에 도달하는 선들은 S-V평면상에서 위 평형점을 기준점으로 하는 점대칭이 되는데 이것은 복합계 내의 엔트로피와 체적이 일정하게 보존되어야 하므로 대응되는 증감이 부호는 다르고 양적으로 같아야 하기 때문이다. 따라서, 복합계의 평형상태는 S-V평면상에서 두 단순계의 초기상태를 마주보는 꼭지점으로 하는 직사각형의 정중앙에 위치한다.

Fig. 7에서, 각 소계는 이상기체이므로 체적이 일정한 과정은, 온도가 압력에 단순비례하므로 P-T평면상에서 원점을 지나는 직선이 된다. 따라서 P-T평면상에서는 전반적으로 압력과 온도가 낮은 소계의 변화가 작게 나타난다. 특히 한 소계의 압력이나 온도가 일정한 경우 다른 소계의 온도와 압력은 비교적 복잡한 변화를 겪게 된다.

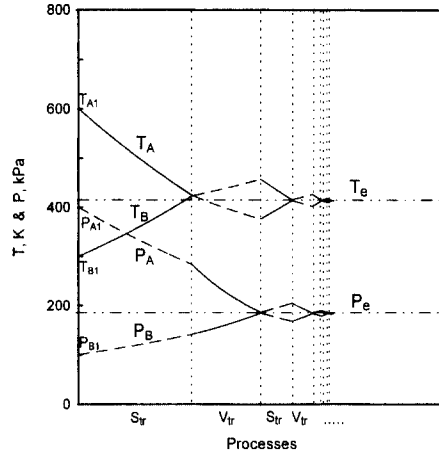


Fig. 8 A Process toward the equilibrium state on the T-S and P-V plane with alternate transfer of entropy and volume.

Fig. 8은 위에서 온도와 압력이 교대로 평형에 도달하는 ⑤번 과정에 대한 T-S선도와 P-V선도를 교대로 보여 준다. 각 과정에서 평형에 도달하는 두 온도선 또는 압력선 사이의 면적은 가용일 방출량을 표시하고 완전한 평형에 이를 때까지 면적의 대수적 합은 곧 최초상태에서의 잠재일이 된다.

3.2 등잠재일 과정

다음은 외부로 가용일이 방출되지 않는 완전고립 복합계의 가능한 상태변화를 고려해 볼 수 있는데, 소계의 독립변수가 두 개 이상인 경우에만 이러한 복합계 내부의 자체적인 상태변화가 가능하고, 잠재일이 일정하게 보존되므로 '등잠재일 과정'이라 할 수 있다. 이 경우 과정은 복합계의 초기상태 또는 복합계의 잠재일에 따라 선도상에 두 개의 폐곡선군으로 나타나는데 하나의 단순계가 상대적으로 무한히 큰 경우, 무한용량계의 상태변화는 다른 폐곡선 내에서 하나의 점이 될 것이다.

Fig. 9은 위에서 주어진 고립복합계의 여러 가지 상태에서의 등잠재일 과정을 T-P평면상에 표시한 것으로 이 경우 두 단순계가 동일하므로 두 폐곡선은 하나로 겹쳐져 있다. 그림에서 한 단순계의 체적은 복합계 전체의 체적보다 작아야 하므로

$$\frac{RT}{P} V_A < V_T \tag{15}$$

의 범위에 머무르게 되고, 한 복합계의 상태에서

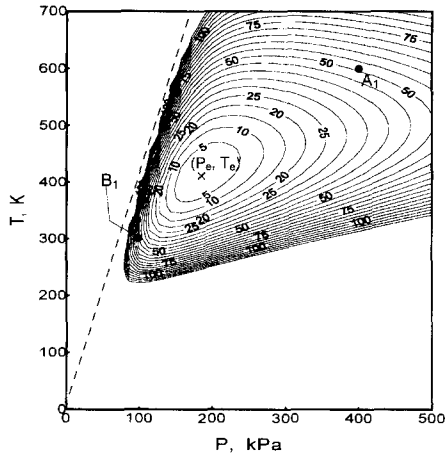


Fig. 9 The constant potential work lines of a composite system on the T-P plane.

두 소계의 상태는 한 폐곡선상의 대체로 서로 마주 보는 지점에 위치할 것이다.

Fig. 10은 Fig. 9의 고립복합계의 등잠재일 과정을 S-V평면상에 표시한 것으로 원래는 점대칭의 두 폐곡선이 되어야 하나 이 경우 역시 하나로 겹쳐져 있고 주어진 복합계의 한 상태에서 두 단순계의 상태는 서로 정확하게 마주보는 위치에 존재하여야 한다. 이러한 폐곡선은 복합계의 주어진 체적 및 엔트로피에 의하여 하나로 결정되며 평형상태에서는 잠재일이 0이 되고 주위로 멀어질수록 잠재일은 증가하게 된다. 따라서, 가용일이 출입할 수 있는 일반적 고립복합계의 경우 잠재일 방출과정은 폐곡선 안쪽으로 과정이 진행되고, 가용일 흡수과정에서는 폐곡선 외부로 과정이 진행되게 된다. 이것은 앞 절에서 표시한 여러가지 과정들을 등잠재일 곡선상에 표시할 경우 과정의 진행에 따른 잠재일의 변화 추이를 쉽게 알 수 있다.

여기서 등잠재일 과정은 2장에서의 등잠재일 상태와 구별하여야 하는데, 여기서의 등잠재일 과정이란 고립복합계의 조건을 만족시키면서 복합계의 한 상태에서부터 진행해 나갈 수 있는 상태들을 의미하고, 후자의 등잠재일 상태는 한 소계의 초기상태가 주어졌을 때 복합계의 잠재일이 같은 다른 소계의 초기상태들을 의미한다.

3.3 가용일 흡입과정

위에서는 가용일이 가역적으로 방출되거나 방출되지 않고 잠재일이 일정하게 유지되는 경우의 고

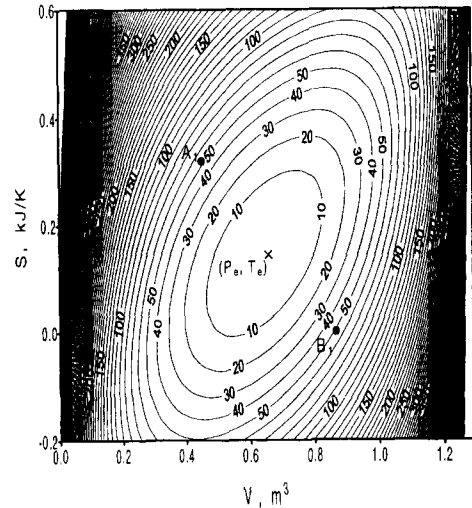


Fig. 10 The constant potential work lines of a composite system on the S-V plane.

립복합계의 상태변화 과정만을 다루었으나 가용일이 가역적으로 흡입되는 경우도 있을 수 있다. 이 경우 고립계의 특성으로서 복합계 전체의 엔트로피와 체적이 일정하게 유지되므로 S-V선도상에서의 표시는 Fig. 4에서와 같이 점대칭으로 나타나고 T-P선도상에서의 표시 역시 Fig. 5에서의 가용일 방출의 경우와 비슷하나 과정의 진행은 평형상태로부터 멀어지게 될 것이다. 특히 이 경우를 Fig. 7이나 Fig. 8의 등잠재일 곡선상에서 표시하면 잠재일 흡수과정은 과정의 진행에 따라 소계들의 상태가 폐곡선의 외부로 이동하게 되고 잠재일이 증가되는 추이를 확인할 수 있을 것이다.

3.4 비가역 과정

과정이 완전가역이 되지 못하고 비가역적 소산이 발생할 경우, 추출되는 가용일 중 일부 또는 전부가 엔트로피로 변하여 복합계 내에 잔류하게 되는데 그 결과 복합계의 전체 엔트로피가 증가하게 된다. 따라서 비가역적으로 도달하는 평형상태는 가역적인 경우에 비하여 전체 엔트로피가 증가하며, 전체 체적은 일정하므로 S-V평면에서 가역적인 경우에 비하여 약간 위쪽으로 이동하게 될 것이다. 또한 이 때의 평형온도와 평형압력은 모두 증가하므로 P-T 평면상에서는 가역적인 경우의 평형상태보다 우상쪽으로 이동한다. 따라서 이 경우는 평형상태가 가역적인 경우와는 다른 복합계가 구성되므로 등잠재일 곡선 자체가 순간순간 변화하게 된다.

그러나 비가역 과정의 진행은, 발생한 가용일 중 소산되는 비율과 생성된 엔트로피가 각 소계로 흡수되는 비율 등이 과정의 진행에 따라 지정되어야 하므로 복잡한 양상이 되고 별도의 분석이 요구된다. 그러나 비가역과정의 결과 생성된 엔트로피가 외부로 방출되는 경우는 복합계의 상태에 이차적인 영향을 미치지 않으므로 가역적으로 가용일을 방출한 경우와 동일하게 된다.

4. 결 론

가용일과 잠재일로 표현되는 일반화된 가용에너지 개념의 존재성과 특성을 설명하기 위하여, 한 예로서 이상기체의 성질을 가지는 두 단순계로 구성된 복합계에 대하여, 추출 가능한 최대 가용일 즉 잠재일의 계산례를 보이고, 가역적 가용일 방출 과정과 등잠재일 과정 등에 따른 복합계의 상태변화 과정을 여러가지 선도 상에 표시하였다. 본 연구에서는 가역과정에 한하여 상태변화과정 등을 취급하였으나, 비가역과정에 대하여서도 이러한 정량적 계산례의 표시 등이 필요하나 이 경우는 비가역도와 생성된 엔트로피의 유입을 표시하는 추가의 매개변수의 정의가 필요하다.

잠재일에 의한 복합계의 특성 분석은 아직 어떠한 문헌에서도 본격적으로 시도되지 않고 있으나 잠재일의 존재와 복합계의 거동특성은 불가분의 관계가 있다. 이와 같은 에너지의 가용성에 의한 복합계의 거동특성에 관한 연구는 에너지 변환원리에 대한 근원적인 이해를 위하여서는 필수적인 사항으로서, 공학적인 목적에 국한되지 않고 자연현상 일반에 대한 심도 있는 이해에도 도움이 될 것이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 터보동력기계 연구센터를 통한 한국과학재단 우수 연구센터 지원금에 의한 것이다.

참고문헌

- (1) Elias P. Gyftopoulos and Gian Paolo Beretta, 1991, "Ch. 5 Adiabatic Availability," Thermodynamics: Foundation and Applications, Macmillan Publishing Company, New York, pp. 69~83.
- (2) 정평석, 노승탁, 1993, "에너지의 가용성과 열역학의 재구성(1)-가역세계열역학," 대한기계학회논문집, 제17권, 제 5 호, pp. 1227~1236.
- (3) 정평석, 김수연, 1997 "두 열적 단순계로 구성된 복합계의 열역학", 대한기계학회논문집, 제24권, 제2호, pp. 275~284,
- (4) W. J. Wefer and R. A. Gaggioli, 1980, "Reference Datums for Available Energy," Thermodynamics: Second Law Analysis, American Chemical Society Symposium Series 122, pp. 77~92.
- (5) 노승탁, 1986, 최신공업열역학, 문운당, p. 121.
- (6) M. M. Abott and H. C. Van Ness, 1976, Thermodynamics, Shaum's Outline Series, Mc Graw Hill, p. 44.
- (7) G. J. Van Wylen and R. E. Sontag, 1985, "Fundamentals of Classical Thermodynamics," 3rd ed. Wiley, p. 287.
- (8) L. D. Landau and E. M. Lifshitz, 1980, Statistical Physics, 3rd ed. Part 1, Volume 5 of Course of Theoretical Physics, Pergamon Press, New York, p. 57.