

# 열역학적 사이클의 제2법칙 효율의 정의에 대한 기본 연구

박 경 근<sup>†</sup>

국민대학교 기계시스템공학부

## Basic Study on the Definition of the Second Law Efficiencies of Thermodynamic Cycles

Kyoung Kuhn Park<sup>†</sup>

School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received August 10, 2012; revision received October 12, 2012)

**ABSTRACT:** A general concept on the definition of the second law efficiencies of thermodynamic cycles is introduced. The efficiency is defined to be proportional to the entropy generation divided by the maximum possible entropy generation. This way of definition of the cycle efficiency is clear and concise and, moreover, follows faithfully the concept of the second law of thermodynamics. This definition is applied to heat engine, refrigerator and heat pump. The second law efficiencies of heat engine and refrigeration cycles are derived, which are the same as the existing ones, respectively. The second law efficiency of heat pump, however, finds to be different from the existing one. Discussion is given about the difference and its cause.

**Key words:** Thermodynamic cycle(열역학적 사이클), Second law efficiency(제2법칙 효율), Refrigeration(냉동), Heat pump(열펌프), Exergy(엑서지)

### 기 호 설 명

### 그 리 스 문 자

$A, B$	: 열기관	$\eta$	: 효율
COP	: 성능계수	$\psi$	: 엑서지
$c_p$	: 정압 비열 [kJ/kgK]		
$\dot{m}$	: 질량유량 [kg/s]		<b>상첨자</b>
$N_s$	: 생성 엔트로피 수		
$Q$	: 열 [kJ]	$max$	: 최대값
$S$	: 엔트로피 [kJ/K]		
$T$	: 온도 [K]		<b>하첨자</b>
$W$	: 일 [kJ]		
$Y_s$	: 열교환 가역성 기준	$0$	: 주위
		$1$	: 제1법칙
		$2$	: 제2법칙
		$destroyed$	: 파괴되는
		$input$	: 입력

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4679; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: pkk@kookmin.ac.kr

<i>gen</i>	: 생성
<i>H</i>	: 고온
<i>HP</i>	: 열펌프
<i>L</i>	: 저온
<i>R</i>	: 냉동기
<i>output</i>	: 출력
<i>rev</i>	: 가역
<i>s</i>	: 엔트로피
<i>th</i>	: 열기관

## 1. 서 론

효율은 사이클 효율(cycle efficiency)과 기기 효율(component efficiency) 두 가지로 크게 구분된다. 사이클 효율은 사이클 성능의 척도이며, 열기관 사이클의 열효율(thermal efficiency)과 냉동사이클의 성능계수(COP, coefficient of performance)를 각각 별도로 정의하여 사용하고 있다. 이들은 열역학 제1법칙에 근거하여 정의하며 변환되는 에너지의 비로 표현하므로 제1법칙 효율( $\eta_1$ ) 또는 변환 효율이라고도 한다.<sup>(1-3)</sup>

제1법칙 효율은 가능한 최고 성능을 참조하지 않으므로 오해의 여지가 있다.<sup>(1)</sup> 예를 들어, 두 개의 열기관 *A*와 *B*가 같은 온도의 저온 열원과 서로 다른 온도의 고온 열원 사이에서 각각 작동하지만 열효율은 서로 같다고 하자. 열기관 *A*에 대하여 고온 열원의 온도가 높다면 이용할 수 있는 잠재일이 더 많으므로, 고온열원의 온도가 낮은 열기관 *B*보다 더 많은 일을 할 것을 기대할 수 있다. 그러므로 두 열기관의 제1법칙 효율이 같더라도 열기관 *A*가 열기관 *B*에 비하여 상대적으로 성능이 낮다고 할 수 있다. 이 예로부터 제1법칙 효율만으로는 열기관 사이클의 실제 성능을 완전히 나타내지 못한다는 것을 알 수 있다.

이러한 결점을 보완하기 위하여 열기관의 제2법칙 효율( $\eta_2$ )을, 동일한 조건 하에서 가능한 최고의(가역) 열효율에 대한 실제 열효율의 비로서 정의하여 사용한다. 냉동기 및 열펌프의 경우에는 최고의(가역) 성능계수에 대한 실제 성능계수의 비로 제2법칙 효율을 정의할 수 있다. 그 결과로 제2법칙 효율은 0과 1사이의 값을 갖는다. 최하의 경우(최대 비가역)에 0이 되고 최상의 경우(가역)에 1이 되므로 합리적이다. 제2법칙 효율(second law efficiency)은 열역학 제2법칙에 근거하여 정의한 것이며,

합리적 효율(rational efficiency)이라고도 한다.

제2법칙 효율은 열기관의 경우에는 최대로 가능한 가역일에 대한 실제 출력일의 비가 된다. 냉동기나 열펌프의 경우에는 실제 입력일에 대한 최소로 가능한 가역일의 비가 된다. 여기서 가역일은 실제 과정과 동일한 조건에서 구한다.

이렇게 정의한 제2법칙 효율은 일을 생산하거나 소비하는 사이클에 대하여만 적용할 수 있다는 한계가 있다. 그러므로 보다 일반적인 정의가 필요하여 엑서지(exergy,  $\Psi$ ) 즉 가용성(availability)의 개념을 도입하게 된다. 열기관의 경우, 최대로 가능한 가역일은 기관에 입력되는 열의 엑서지에 해당하며, 출력일은 출력 엑서지에 해당한다. 냉동기의 경우에 공급되는 일은 입력 엑서지이며, 저온 물체로부터 전달된 열의 엑서지는 출력 엑서지이다. 열펌프의 경우, 고온 물체에 전달되는 열의 엑서지는 출력 엑서지이다. 따라서 효율을 입력 엑서지에 대한 출력 엑서지의 비로 일반화하여 정의할 수 있으며, 엑서지 효율(exergy efficiency)이라고 한다.

엑서지는 열, 일, 운동에너지, 위치에너지, 내부에너지, 엔탈피 등 여러 가지 형태로 공급되거나 회수될 수 있다. 공급되는 엑서지의 구성 요소가 무엇인가에 대한 의견이 종종 다르기 때문에 일반화한 엑서지 효율이 같은 장치에 대해 다르게 정의되기도 한다.<sup>(4-7)</sup> 또한 시스템과 주위 사이의 상호작용을 올바르게 파악하기 위해서는 시스템을 정확히 정의할 필요가 있다.<sup>(1)</sup>

이러한 엑서지 효율의 문제점을 해결하기 위해서 효율을-구성요소에 대한 의견이 다를 수 있는 엑서지가 아닌-생성 엔트로피를 이용하여 정의할 수 있다. 이러한 정의 방식은 1990년 Sekulic<sup>(8)</sup>이 제안하여 열교환기의 에너지 변환 성능을 측정하는 수단으로 이용하였던 개념과 유사하다.<sup>(8, 9)</sup>

본 연구에서는 생성 엔트로피를 이용하여 효율을 정의하는 방법을 열기관과 냉동기, 열펌프 등의 사이클에 적용하여 그 결과를 파악하고, 기존의 제2법칙 효율 및 엑서지 효율과 비교 평가하고자 한다.

## 2. 사이클 효율의 정의

### 2.1 제2법칙 효율과 엑서지 효율

Fig. 1의 열기관의 제2법칙 효율은 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_2 = \eta_{th} / \eta_{th,rev} \quad (1)$$

여기서  $\eta_{th} = W/Q_H$ ,  $\eta_{th,rev} = W_{rev}/Q_H$ 이며  $Q_H$ 는 고온 열원에서 열기관으로 전달되는 열량,  $W$ 는 실제 열기관의 출력일,  $W_{rev}$ 는 동일한 조건에서 작동하는 가역 열기관의 출력일이다.

Fig. 2의 냉동기의 제2법칙 효율은 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_2 = \frac{COP_R}{COP_{R,rev}} \quad (2)$$

여기서  $COP_R = Q_L/W$ ,  $COP_{R,rev} = Q_L/W_{rev}$ 이며,  $Q_L$ 은 저온 열원에서 제거한 열량,  $W$ 는 실제 냉동기의 입력일,  $W_{rev}$ 는 동일한 조건에서 작동하는 가역 냉동기의 입력일이다.

Fig. 3의 열펌프의 제2법칙 효율은 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_2 = \frac{COP_{HP}}{COP_{HP,rev}} \quad (3)$$

여기서  $COP_{HP} = Q_H/W$ ,  $COP_{HP,rev} = Q_H/W_{rev}$ 이며,  $Q_H$ 는 고온 열원에 공급되는 열량,  $W$ 는 실제 열펌프의 입력일,  $W_{rev}$ 는 동일한 조건에서 작동하는 가역 열펌프의 입력일이다.

열기관의 제2법칙 효율은, 식(1)을 다음과 같이 정리하여 쓸 수 있다.

$$\eta_2 = W/W_{rev} \quad (4)$$

냉동기의 제2법칙 효율은, 식(2)를 다음과 같이 정리하여 쓸 수 있다.

$$\eta_2 = W_{rev}/W \quad (5)$$

열기관의 제2법칙 효율에 대한 식(4)에서  $W$ 는 출력 엑서지( $\Psi_{output}$ )로 볼 수 있으며,  $W_{rev} = (1 - T_L/T_H)Q_H$ 는 입력 엑서지( $\Psi_{input}$ )로 볼 수 있다. 마찬가지로 냉동기의 제2법칙 효율에 대한 식(5)에서  $W_{rev} = (T_H/T_L - 1)Q_L$ 은 출력 엑서지( $\Psi_{output}$ )이고,  $W$ 는 입력 엑서지( $\Psi_{input}$ )로 볼 수 있다. 이를 종합하면 엑서지 효율은 다음과 같다.

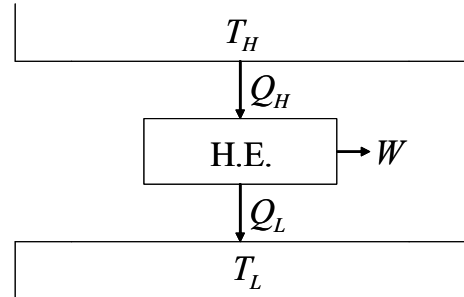


Fig. 1 Schematic for heat engine.

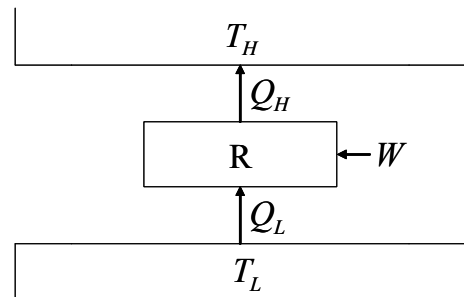


Fig. 2 Schematic for refrigerator.

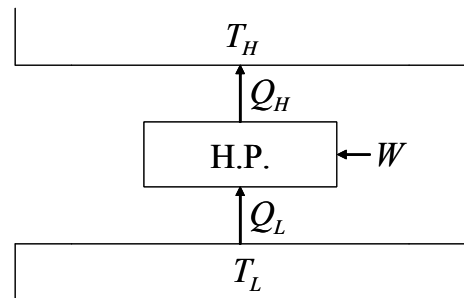


Fig. 3 Schematic for heat pump.

$$\eta_2 = \frac{\Psi_{output}}{\Psi_{input}} \quad (6)$$

한 사이클 동안에 파괴되어 없어진 엑서지의 크기를  $\Psi_{destroyed}$ 라고 하면

$$\Psi_{input} = \Psi_{output} + \Psi_{destroyed} \quad (7)$$

이므로

$$\eta_2 = 1 - \frac{\Psi_{destroyed}}{\Psi_{input}} \quad (8)$$

이다.<sup>(1)</sup> 여기서,  $\Psi_{destroyed} = T_0 S_{gen}$  이고,  $T_0$ 는 주위의 온도이며,  $S_{gen}$ 는 한 사이클 동안 비가역성에 의

해 만들어지는 생성 엔트로피(entropy generation)이다. 열역학 제2법칙 즉 Clausius 부등식에 의하면, 사이클에 대하여

$$S_{\geq n} = - \oint \delta Q / T \geq 0 \quad (9)$$

이다. 최종적으로 엑서지 효율을 다음과 같이 일반적으로 표현할 수 있다.<sup>(2)</sup>

$$\eta_2 = 1 - T_0 S_{\text{gen}} / \Psi_{\text{input}} \quad (10)$$

## 2.2 생성 엔트로피를 이용하는 효율의 정의

1990년 Sekulic<sup>(8)</sup>은 에너지 변환의 질적 수준이라는 개념을 제안하여 열교환기의 성능을 평가하고자 하였다. 이 개념은 다음과 같은 열교환 가역성 기준(heat exchange reversibility norm),  $Y_s$ 로 표현할 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$Y_s = 1 - N_s / N_{s,\text{max}} \quad (11)$$

여기서, 생성 엔트로피 수  $N_s = S_{\text{gen}} / \dot{m} c_p$ 이고,  $S_{\text{gen}}$ 은 단위 시간당 생성 엔트로피,  $\dot{m}$ 은 질량 유량,  $c_p$ 는 비열이다. 제2법칙 효율 및 엑서지와 관련된 연구로서 식(11)은 지금까지 거의 주목받지 못하였으며, 2007년에 Sciuabba and Wall<sup>(10)</sup>이 정리, 발표한 엑서지의 역사에는 Sekulic이 제안한 개념이 인용되지 않고 있다.

식(10)과 식(11)을 참조하여 사이클에 대한 효율을 정의할 수 있다. 효율은 엄밀하게 0과 1사이의 값을 갖도록 한다. 최하의 경우(엑서지가 완전히 소멸됨 또는 생성 엔트로피가 최대가 됨)에 0이 되어야 하고, 최상의 경우(엑서지가 전혀 소멸되지 않음 또는 생성 엔트로피가 0이 됨)에 1이 되어야 한다. 최대 생성 엔트로피를  $S_{\text{gen}}^{\text{max}}$ 로 나타내면  $0 \leq S_{\geq n} \leq S_{\text{gen}}^{\text{max}}$ 의 관계가 성립하므로 엑서지 효율을 생성 엔트로피에 직접 선형으로 비례하도록 정의하면,

$$\eta_2 = 1 - \frac{T_0 S_{\text{gen}}}{T_0 S_{\text{gen}}^{\text{max}}} \quad (12)$$

이 될 것이다. 가역 사이클에 대하여  $S_{\text{gen}} = 0$ 이므로  $\eta_2 = 1$ 이고, 최대로 비가역인 사이클에 대하여

$S_{\text{gen}} = S_{\text{gen}}^{\text{max}}$ 이므로  $\eta_2 = 0$ 이 되므로 식(12)는 합리적 효율에 관한 상식적인 기본 요건을 충족한다.

본 연구에서는 효율을 일반적으로 정의하는 새로운 방법인 식(12)을 열기관과 냉동기, 열펌프 사이클에 대하여 적용하여 효율을 일관되고, 명확하며, 효과적으로 결정할 수 있음을 예시하고자 한다.

## 3. 사례 연구 및 논의

### 3.1 열기관 사이클

열기관 사이클에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다. 열역학 제1법칙식과 제2법칙식은 각각 다음과 같다.

$$Q_H = W + Q_L \quad (13)$$

$$S_{\text{gen}} = - Q_H / T_H + Q_L / T_L \quad (14)$$

여기서  $T_H$ ,  $T_L$ ,  $Q_H$ 는 그 값이 고정되어 있다고 가정한다.  $Q_L$ 의 크기에 대하여는 관심이 적으므로 식(13)을 이용하여  $Q_L$ 을 소거하면

$$S_{\text{gen}} = Q_H(1/T_L - 1/T_H) - W/T_L \quad (15)$$

이 된다. 주어진 조건에 의하면 식(15)에서  $W$ 를 제외한 모든 변수는 그 값이 고정되어 있으므로  $S_{\text{gen}}$ 은  $W$ 에 전적으로 좌우된다. 제1법칙 효율이 0인 경우에  $W=0$ 이며  $S_{\text{gen}}$ 이 최대가 된다. 따라서

$$S_{\geq n}^{\text{max}} = Q_H(1/T_L - 1/T_H) \quad (16)$$

이며, 제2법칙 효율은 식(15), 식(16)을 식(12)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\eta_2 = \frac{W}{Q_H(1 - T_L/T_H)} \quad (17)$$

열기관의 효율  $\eta_{\text{th}} = W/Q_H$  이고, 가역 Carnot 열기관의 효율  $\eta_{\text{th,rev}} = 1 - T_L/T_H$ 이므로 식(17)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta_2 = \frac{\eta_{\text{th}}}{\eta_{\text{th,rev}}} \quad (18)$$

식(18)은 기존의 정의 식(1)과 일치한다.

### 3.2 냉동 사이클

냉동 사이클에 대한 개략도는 Fig. 2와 같다. 열역학 제1법칙식과 제2법칙 식은 각각 다음과 같다.

$$Q_H = W + Q_L \quad (19)$$

$$S_{\text{gen}} = Q_H/T_H - Q_L/T_L \quad (20)$$

여기서  $T_H$ ,  $T_L$ ,  $W$ 는 그 값이 고정되어 있다고 가정한다.  $Q_H$ 의 크기에 대하여는 관심이 적으므로 식(19)를 이용하여  $Q_H$ 을 소거하면

$$S_{\text{gen}} = W/T_H - Q_L(1/T_L - 1/T_H) \quad (21)$$

이 된다. 주어진 조건에 의하면 식(21)에서  $Q_L$ 을 제외한 모든 변수는 그 값이 고정되어 있으므로  $S_{\text{gen}}$ 은  $Q_L$ 에 전적으로 좌우된다.  $\text{COP}_R$ 가 0인 경우에  $Q_L = 0$ 이며  $S_{\text{gen}}$ 이 최대가 된다. 따라서

$$S_{\text{gen}}^{\text{max}} = W/T_H \quad (22)$$

이며, 제2법칙 효율은 식(21), 식(22)를 식(12)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\eta_2 = \frac{Q_L/W}{T_L/(T_H - T_L)} \quad (23)$$

냉동기의 성능계수  $\text{COP}_R = Q_L/W$ 이고, 가역 Carnot 냉동기의 성능계수  $\text{COP}_{R,\text{rev}} = T_L/(T_H - T_L)$ 이므로 식(23)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta_2 = \frac{\text{COP}_R}{\text{COP}_{R,\text{rev}}} \quad (24)$$

식(24)는 기존의 정의 식(2)와 일치한다.

### 3.3 열펌프 사이클

열펌프 사이클에 대한 개략도는 Fig. 3과 같다. 열역학 제1법칙식과 제2법칙 식은 각각 다음과 같다.

$$Q_H = W + Q_L \quad (25)$$

$$S_{\text{gen}} = Q_H/T_H - Q_L/T_L \quad (26)$$

여기서  $T_H$ ,  $T_L$ ,  $W$ 는 그 값이 고정되어 있다고 가정한다.  $Q_L$ 의 크기에 대하여는 관심이 적으므로 식(25)를 이용하여  $Q_L$ 을 소거하면

$$S_{\text{gen}} = W/T_L - Q_H(1/T_L - 1/T_H) \quad (27)$$

이 된다. 주어진 조건에 의하면 식(27)에서  $Q_H$ 를 제외한 모든 변수는 그 값이 고정되어 있으므로  $S_{\text{gen}}$ 은  $Q_H$ 에 전적으로 좌우된다.  $\text{COP}_{\text{HP}}$ 가 최소 즉 1인 경우에  $Q_H = W$ 이며  $S_{\text{gen}}$ 이 최대가 된다. 따라서

$$S_{\text{gen}}^{\text{max}} = W/T_H \quad (28)$$

이며, 제2법칙 효율은 식(27), 식(28)을 식(12)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\eta_2 = \frac{Q_H/W - 1}{T_L/(T_H - T_L)} \quad (29)$$

열펌프의 성능계수  $\text{COP}_{\text{HP}} = Q_H/W$ 이고, 가역 Carnot 열펌프의 성능계수  $\text{COP}_{\text{HP},\text{rev}} = T_H/(T_H - T_L)$ 이므로 식(29)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta_2 = \frac{(\text{COP}_{\text{HP}} - 1)}{(\text{COP}_{\text{HP},\text{rev}} - 1)} \quad (30)$$

식(30)은 기존의 정의 식(3)과 같지 않다.

### 3.4 논의

이상의 세 가지 사례 연구에서, 열기관과 냉동기의 제2법칙 효율은 새로운 정의 식(12)를 이용하여 구한 식과 기존의 식이 각각 같았다. 이는 정의 식(12)가 일반적으로 통용될 수 있음을 나타내고 있다.

그러나 열펌프에 대하여는 기존의 제2법칙 효율 식(3)과 새로운 정의 식(12)를 이용하여 결정한 식(30)은 같지 않다.

우선 냉동기에 대한 식(23), 식(24)는 열펌프에 대한 식(29), 식(30)과 같다. 즉, 운전 조건과 상태가 같다면, 식(12)를 이용하여 구하는 냉동기의 제2법칙 효율과 열펌프의 제2법칙 효율은 같다. 같은 시스템을, 냉방을 목적으로 사용하는 경우에는 냉동기, 난방을 목적으로 사용하는 경우에는 열펌프라고 구분

하므로, 운전 조건과 상태가 같다면 제2법칙에 근거하여 생성 엔트로피가 같으므로, 제2법칙 효율은 당연히 서로 같아야 할 것이다. 사실 Fig. 2와 Fig. 3은 같은 그림이다.

반면에, 제1법칙에 근거하는 냉동기의 성능계수와 열펌프의 성능계수는 다르게 정의하며, 다음과 같이 1만큼의 차이가 있다.

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \text{COP}_{\text{R}} + 1 \quad (31)$$

여기서  $\text{COP}_{\text{R}} \geq 0$ 이므로  $\text{COP}_{\text{HP}} \geq 1$ 이 된다. 따라서 열펌프에 대한 기존의 식(3)을 적용하는 경우에 제2법칙 효율의 최소값은 0이 아니라  $1/\{T_H/(T_H - T_L)\} = 1 - T_L/T_H$ 가 된다. 이는 효율값이 0과 1사이에 있어야 하는 상식적인 기본 요건에서 벗어나는 것이며 불합리하다.

식(3)으로 제2법칙 효율을 구한다고 할 때 그 효율이 0이 되는 상황을 상상할 수는 있다. 그 상황은  $Q_H = 0$  즉,  $Q_L = -W$ 이며, 물리적으로는 난방 효과는 전혀 없이, 외부입력 전기일로 주위를 가열하는 경우이다. 그러한 시스템을 작동할 이유는 아마도 없을 것이며, 그 시스템을 열펌프라고 칭하지도 않을 것이다.

열펌프에 관하여, 기존의 효율 정의 방법에 이와 같은 문제점이 생기는 이유는 제2법칙 효율을 정의하면서 성능계수를 무조건 대입하여 비값을 구하였기 때문이다. 효율이나 성능계수의 최소값이 0인 열기관과 냉동기의 경우에는 식(1), 식(2)로 제2법칙 효율을 결정하면, 그 효율값은 당연히 0과 1사이에 존재하지만, 성능계수의 최소값이 1인 열펌프의 경우에는 식(3)으로 제2법칙 효율을 구하면 앞서 언급한 바와 같이 효율의 최소값은 0이 아닌 양수가 되며, 전반적으로 효율을 다소 크게 예측하는 결과가 된다. 예를 들어  $T_L = 7^\circ\text{C}$ ,  $T_H = 20^\circ\text{C}$ ,  $\text{COP}_{\text{HP}} = 3$ 인 경우에  $\text{COP}_{\text{HP,rev}} = 22.55$ 이므로 식(3)으로 계산한 제2법칙 효율은 13.3%이고, 식(30)으로 계산한 효율은 9.3%이다. 효율값을 근거로 열펌프의 성능이 적절인가 여부를 판단하게 되므로, 어떤 방식으로 효율값을 계산할 것인가는 중요한 문제이다.

이상과 같이 사이클의 제2법칙 효율을 정의하는 새로운 방법을 제시하였으며, 열펌프의 효율에 관한 기존의 정의 방법에 내재된 문제점을 파악하였다. 한편, 사이클을 구성하는 기기의 엑서지 효율을

식(12)를 이용하여 결정하는 방법에 관한 연구는 진행 중이며 곧 그 결과를 보고할 예정이다.<sup>(11)</sup>

#### 4. 결 론

사이클의 제2법칙 효율을 한 사이클 당 발생하는 생성 엔트로피에 선형으로 비례하도록 정의하는 새로운 방법을 제시하였다. 그 결과로, 가역 사이클에 대하여 효율이 1이 되고, 가능한 최대 비가역인 사이클에 대하여 효율이 0이 된다. 효율값이 0과 1사이에서 항상 존재하므로 합리적 효율의 정의에 잘 부합하며 상식적이다.

이러한 새로운 정의에 의해 구한 열기관과 냉동기의 사이클 효율은 기존의 사이클 효율과 일치하므로 새로운 정의 방법이 일반적으로 통용될 수 있음을 파악하였다.

그러나 열펌프의 경우에는 새로운 정의에 의한 효율과 기존의 효율이 일치하지 않았다. 그 이유는 기존의 효율의 최소값이 0이 될 수 없기 때문이다. 기존의 방법으로는 열펌프 사이클의 제2법칙 효율은 실제 성능계수를 이상적인 가역 열펌프의 성능계수로 나누어 구한다. 열펌프의 성능계수가 항상 1보다 크므로 기존의 제2법칙 효율은 0이 아닌 양의 최소값과 1사이에서 그 값이 존재한다.

#### 후 기

이 논문은 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 20114010100070).

#### 참고문헌

1. Cengel, Y. A. and Boles, M. A., 2011, Thermodynamics : An Engineering Approach, 7th ed., McGraw-Hill, New York, pp. 432-435.
2. Borgnakke, C. and Sonntag, R. E., 2009, Fundamentals of Thermodynamics, 7th ed., SI version, John Wiley and Sons, New York, pp. 351-357.
3. Moran, M. J. and Shapiro, H. N., 2008, Fundamentals of Engineering Thermo-dynamics, 6th ed., John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, pp. 359-365.

4. DiPippo, R., 2004, Second law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids, *Geothermics*, Vol. 33, pp. 565-586.
5. Dincer, I. and Rosen, M. A., 2007, *Exergy : Energy, Environment and Sustainable Development*, Elsevier, Amsterdam, pp. 11-15.
6. Lior, M. and Zhang, N., 2007, Energy, exergy, and second law performance criteria, *Energy*, Vol. 32, pp. 281-296.
7. Marmolejo-Correa, D. and Gundersen, T., 2012, A comparison of exergy efficiency definitions with focus on low temperature processes, *Energy*, Vol. 44, pp. 477-489.
8. Sekulic, D. P., 1990, The second law quality of energy transformation in a heat exchanger, *J. Heat Transfer(Trans. ASME)*, Vol. 112, pp. 295-300.
9. Yilmaz, M., Sara, O. N., and Karsli, S., 2001, Performance evaluation criteria for heat exchangers based on second law analysis, *Exergy Int. J.*, Vol. 1, pp. 278-294.
10. Sciubba, E. and Wall, G., 2007, A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004, *Int. J. Thermodyn.*, Vol. 10, pp. 1-26.
11. Park, K. K., Basic study on the definition of the second law efficiencies of processes and components, manuscript in preparation.