

공기 엔진의 에너지 효율 평가

박재현 · 백제현*

포항공과대학교 기계공학과

Evaluation of the Energy Efficiency of the Air Engine

Jaehyeon Park¹⁾ · Jehyun Baik^{*2)}

Department of Mechanical Engineering, POSTECH, Gyeongbuk 37673, Korea
 (Received 8 January 2015 / Revised 28 April 2015 / Accepted 10 June 2015)

Abstract : Nowadays, many people are trying to develop eco-friendly engines such as the electric motor and the air engine because the I.C. engine cause a lot of pollutants. Nevertheless of these effort, there are few evaluation and comparison of these engines to conventionally used I.C. engines. Because of this, it is difficult to determine that the eco-friendly engines are really energy saving engines. In this paper, the efficiency of the air engine is calculated. The air engine does not cause environmental pollution problem because it uses “Compressed air”. Due to the air engine operated at a low temperature and spark-free condition, this engine can be used in extreme condition for safety. Despite the many advantages of the air engine, there are few analysis on the air engine because of an air engine is low energy density.

Key words : Air engine(공기 엔진), Compressed air car(압축 공기 자동차), Valve-train system(밸브트레인 시스템), Engine efficiency(에너지 변환 효율), Cruising efficiency(항속 효율)

Nomenclature

p	: pressure	[Pa]
V	: volume	[m ³]
v	: driving velocity	[m/s]
C_d	: drag coefficient	[-]
R_r	: rolling resistance	[N]
R_a	: aerodynamic resistance	[N]
f	: friction factor	[-]
N	: normal force	[N]
ρ	: density	[kg/m ³]
A_f	: frontal area	[m ²]
W_i	: iso-thermal compression work	[J]
η_e	: energy conversion efficiency	[%]

η_e	: cruising efficiency	[%]
N_L	: power per liter	[kW/liter]
N_E	: brake power	[kW]
V_H	: displacement volume	[liter]

Subscripts

- 1 : before compression
- 2 : after compression

1. 서론

1.1 공기 엔진 (Air Engine)

현재 널리 쓰이고 있는 많은 동력 발생장치(이하 엔진)들은 화석 연료를 기반으로 하며, 이에 따른 환경오염 문제가 존재한다. 또한 에너지 낭비를 최소화

*Corresponding author, E-mail: jhbaek@postech.ac.kr

화하기 위해 높은 효율을 가지는 에너지원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 결과, 대체에너지를 이용하는 전기모터, 하이브리드 엔진 그리고 공기엔진 등의 여러 엔진이 등장하고 있다.

내연 기관은 연료의 연소(Combustion) 반응을 통해 단시간에 높은 압력을 얻고 이를 이용하여 동력을 얻는다. 전기 모터는 전자기력을 이용, 회전자(Rotor)가 토크를 얻어 동력을 얻는다. 한편, 공기 엔진은 저장된 공기가 팽창하는 힘을 이용해 토크를 발생시켜 동력을 얻는다. 즉, 내연기관은 연소반응을 통해 순간적으로 큰 힘을 얻을 수 있고, 전기모터와 공기 엔진은 내연기관과 달리 연료 사용 후 오염물질을 발생시키지 않는 장점이 있다. 공기엔진은 내연기관과 전기 모터에 비해 엔진이 가볍고 구조가 간단하며, 압축된 공기를 팽창시켜 저온의 공기를 배출하므로 별도의 냉방 전력이 필요 없다. 이렇게 저온에서 작동하는 압축 공기 엔진은 내연 기관과 달리 고온에서 윤활 및 냉각 역할을 하는 엔진 오일을 사용할 필요가 없으며 극한 상황이 요구되는 곳에서도 동작 가능하다. 예를 들어 불꽃이 발생하면 위험한 폭발 위험이 있는 곳에 사용할 수 있고, 추운날 전기 자동차의 배터리 성능 저하를 걱정할 필요가 없다.

다음 Fig. 1은 각각의 엔진이 구동되기 위해 필요한 에너지 흐름을 나타낸 것이다. 공기 엔진은 압축 공기를 작동 에너지원으로 사용하며, 다양한 방법으로 압축 공기를 얻을 수 있기 때문에(화석 에너지, 전기 에너지, 대체 에너지 등 여러 경로), 최근 다양한 대체 연료의 적용이 시도되고 있는 내연 기관보다 연료의 다양성이 높은 것이 장점이다.

Fig. 1에 따르면 공기 엔진은 압축기 효율과 공기 엔진의 효율의 곱, 전기 모터는 배터리 충전효율과

전기모터 효율의 곱이 내연 기관의 효율보다 높은 경우, 전기 모터와 공기 엔진은 내연기관을 사용할 때보다 에너지를 절약할 수 있다.

전기 모터는 연료 운송 방법으로 배터리를, 공기 엔진은 압축 공기를 이용한다. 이 부분에서 최종적으로 엔진을 구동시키기 위해 필요한 에너지 흐름 단계수는 전기 모터와 공기 엔진이 동일한 수준이다. 전기 모터의 배터리 충전 효율은 공기 엔진의 압축기 효율에 해당하며, 저장 매체로부터 엔진으로 동력 변환 효율은 각각 전기 모터효율과 공기 엔진 효율이다. 공기 엔진은 전기 모터와 마찬가지로 엔진 구동 가능 시간이 매우 짧은데, 이는 에너지 밀도가 내연 기관에 비해 부족하여 상대적으로 연구 개발이 더디게 진행되고 있기 때문이다. 이를 해결할 수 있다면 수송 기관으로서 엔진의 가치를 가질 수 있다. 그러나 활발하게 이루어지고 있는 전기 모터의 연구에 비해 공기 엔진의 연구는 거의 진행되고 있지 않다.

공기 엔진은 그 구조가 간단하고 유지 보수가 저렴하며, 안정성이 요구되는 분야에서 적용될 수 있는데, 이를 상용화하기 위해 우선적으로 공기 엔진의 성능 분석에 대한 연구가 요구된다. 따라서 이 논문에서는 공기 엔진과 내연 기관의 성능을 이론적으로 비교하였다. 또한 공기 엔진을 적용한 차량의 주행 테스트(Driving Test) 결과를 이용하여 공기 엔진의 실제 효율을 측정하였고, 내연기관의 값과 비교하였다. 또한 현재 친환경 엔진으로 각광받는 전기 자동차의 경우와 비교하였고 최종적으로 배기가스를 방출하지 않는 친환경 엔진으로서의 공기 엔진의 실현 가능성을 판단하였다.

1.2 선행 연구 (Previous Studies)

현재까지의 공기 엔진에 대한 연구는 전기 모터나 연료전지, 수소연료 전지 등의 대체 엔진에 비해 매우 적다. 이러한 선행 연구들 중 지금까지 진행되어 온 공기 엔진의 연구는 크게 두 가지가 있다.

첫째, 하이브리드가 아닌 공기 엔진 그 자체에 대한 연구가 있다. V. A. Bogomolov 등은 보다 정확한 수치해석을 위해 이상 기체 상태 방정식에 Compressibility factor를 도입하여 공기 엔진이 외부로 일하는 과정의 폴리트로픽 지수를 수치해석적으로

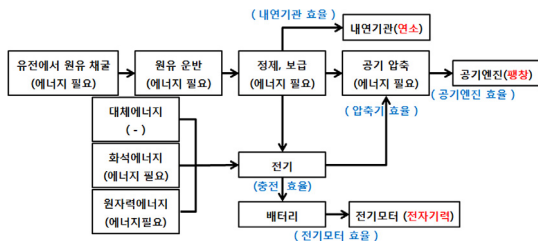


Fig. 1 Energy supply flow of three engines

구하였으며,¹⁾ 같은 해에 I. N. Kudryavtsev 등은 피스톤-실린더의 수학적 모델을 정립하여 공기 엔진의 정확한 성능 해석을 수행 가능하도록 수평 실린더 타입의 공기 엔진 작동을 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션하였다.²⁾ 그리고 Shen 등은 압축 공기를 연료로 하는 125[cc] 배기량의 Rotating vane 형상의 엔진을 가지는 1인승 오토바이를 제작하였고 그 효율을 40[%] 이상으로 계산하였다. 주행 테스트를 통해 최고 속도 30 [km/h]를 기록하였으나, 공기 엔진의 단점으로 짧은 주행거리를 문제점으로 제시하였다.³⁾

둘째, 내연기관의 효율을 높이는 보조 수단으로의 연구가 있다. Felix 등은 공기엔진이 내연기관 혹은 전기 모터와 하이브리드 형태로 사용되었을 때, 보다 이점이 있다고 기술하였다.⁴⁾ Sasa 등은 디젤 엔진의 밸브트레인(Valvetrain)을 수정하여 제동시 공기를 압축하여 저장하고, 가속시 사용하는 방법을 제안하였고 그 성능을 분석하였다.⁵⁾ 그리고 P. Brejaud 등은 공기 하이브리드 엔진에서 압축 과정과 공기 엔진 작동에 대해 1차원 모델을 통해 분석하였고, 공기 엔진에서의 밸브트레인의 중요성과, 공기 엔진은 4행정보다 2행정의 경우가 적합하다는 결론을 내었다.⁶⁾

2. 연구 내용

2.1 공기 엔진 사이클 (Air Engine Cycle)

엔진은 그 내부로 작동 유체가 들어와 일을 하고 나가는 과정을 거치고 이를 사이클(Cycle) 혹은 주기(Period) 라 부른다. Fig. 2는 내연 기관의 이상적 사이클의 PV 선도를 나타내었고, Fig. 3에서 공기 엔진의 이상적 사이클의 P-V 선도를 나타내었다.

Fig. 2와 같이, 가솔린 기관은 오토사이클(Otto cycle)을 따르며 단열 압축 후 정적 연소과정을 거치고, 단열 팽창 그리고 정적 배기 과정을 거치며 외부에 일을 한다. 중·저속 디젤 기관은 디젤사이클(Diesel cycle)을 이용하며 단열압축 후 정압 연소 과정을 거친 뒤 단열 팽창 그리고 정적 배기 과정을 통해 일을 생산한다. 이와 유사하게, Fig. 3에 도시된 순수 공기 엔진의 사이클(Cycle)은 다음 세 과정으로 이루어져 있다.

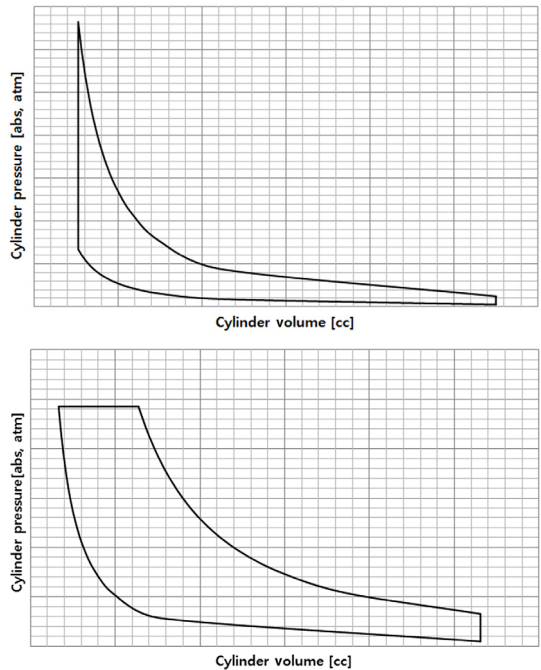


Fig. 2 Ideal P-V diagram of Otto / Diesel cycle

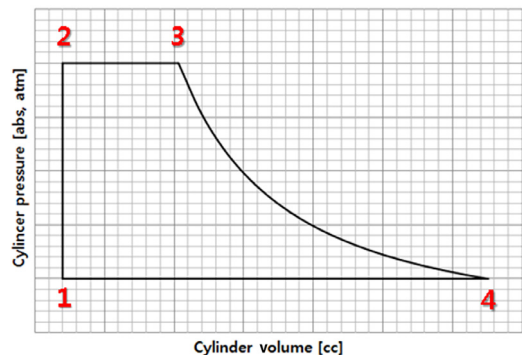


Fig. 3 Ideal P-V diagram of air engine cycle

1) 충전 (Charge) 과정 (1 → 2 → 3)

흡기 밸브만 열렸을 때 실린더-피스톤 구조 내부를 공급 압력으로 채우는 과정이며, 이와 동시에 팽창하여 외부에 일을 한다. 이는 Fig. 3의 정적(Constant volume) 과정과 정압 팽창(Constant pressure Expansion) 과정에 해당한다.

2) 팽창 (Expansion) 과정 (2 → 3 → 4)

충전 과정 종료 후, 흡배기 밸브가 모두 닫힌 채로 팽창하여 외부에 일을 한다. 이 때 실린더 내부 공기

량은 변화 없고, 폴리트로픽(Polytropic) 관계에 따라 압력과 온도가 변한다.

3) 배기 (Exhaust) 과정 (4 → 1)

팽창 과정 종료 후, 배기 밸브가 열려 내부 공기가 배출되며 피스톤이 다시 상사점으로 이동한다.

위 1)~3)의 과정과 같이 공기 엔진은 상사점에서 하사점으로 피스톤이 하강할 때 충전과 팽창 과정이, 하사점에서 상사점으로 피스톤이 상승할 때 배기 과정이 열리는 2행정으로 동작한다.

2.2 공기 엔진 시스템 (Air Engine System)

Fig. 4는 본 연구에서 사용된 차량의 시스템 구성도를 나타낸 것으로, 압축된 공기는 감압 밸브(Regulator)를 통과하여 작동 압력으로 공기 엔진 흡기 포트에 보내진다. 이 공기는 엔진 내부에서 대기압까지 팽창하여 일을 하며, 이 때 엔진은 변속기 및 구동축에 연결되어 동력을 지면에 전달한다.

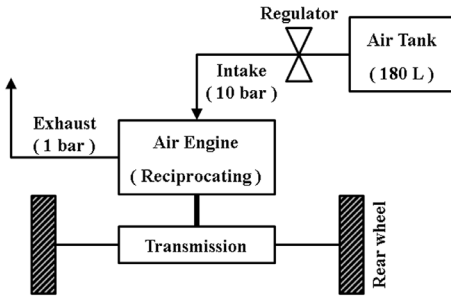


Fig. 4 Diagram of air engine system (single-stage expansion)

공기 엔진의 공기 유입 속도는 높은 공급 압력에 의해 매우 빠르며, 배기 저항을 최소화하기 위해 흡기 밸브가 열리는 시간보다 배기 밸브가 열리는 시간을 길게 하였다. 또한 고압 공기의 손실을 방지하기 위해 흡기 밸브와 배기 밸브의 열림 상태가 중첩(Overlap) 되지 않는 밸브트레인(Valve-train)이 설계되었다.

3. 분석 결과

3.1 비교 모델 (Comparable Model)

본 연구에서 사용된 공기 엔진과 기존 내연 기관

Table 1 “Model” light-weight car specification

Items	Value	Unit	Note
공차중량	795	[kg]	[-]
연비	20.9	[km/liter]	CVS-75
연료	가솔린	[-]	[-]
연료탱크	33	[liter]	[-]

의 성능 비교를 위해, 비교 모델로 800[cc] 급 국산 경형 자동차를 선택하였다. 다음 Table 1에 해당 완성차 업체에서 제시하는 제원을 간략히 요약하였다.

3.2 주행 테스트 (Driving Test)

주행 테스트에 사용된 차량의 제원은 다음 Table 2와 같다. 테스트 공기 엔진 차량은 경형 자동차와 비슷한 크기를 가지고 있으며, 사용된 엔진은 실린더 내경(Bore)보다 행정 거리(Stroke)가 짧은 형상을 가지는 2기통 왕복동(Reciprocating) 형식의 엔진과 전진 3단의 변속기가 적용되었다. 이 때, 공기 저항의 계산을 위한 차량의 전면적(Frontal Area)을 정확히 측정하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 차폭과 전고의 곱으로 가정하였다.

주행 테스트는 안산 스피드웨이 자동차 주행 코스에서 이루어졌으며, 1인 탑승 후, 가속과 감속을 반복하여 충전된 공기가 완전 소진될 때까지 주행 거리를 측정하는 방식으로 진행되었다. 저장 공기 압은 최대 100[bar]였으며, 주행시 사용 압력은 10[bar]로서, 안전을 위해 공기탱크에는 세 번에 걸쳐 공기를 충전하여 총 주행 거리를 합산하였다.

이 때, 테스트된 차량의 평균 주행 프로파일은 Fig. 5와 같으며, 최고단 기어(Top gear)에서 최대 속도 54.7[km/h] (GPS속도 기준)를 달성하였다. 자세한 총 주행 거리는 Table 3과 같고, 결과적으로 공기 자동차는 총 거리 31.8[km]를 평균 속도 24.91 [km/h]로 주행하였다.

Table 2 The air car specification

Items	Value	Unit	Note
공차 중량	450	[kg]	[-]
공급 압력	10	[bar]	[-]
공기탱크부피	180	[liter]	[-]
변속기	3	[speed]	Manual Transmission

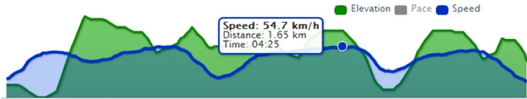


Fig. 5 Drive profiles of air engine

Table 3 Recorded going distance of the air engine

Items	Step 1	Step 2	Step 3	Unit
탱크압력	80	100	100	[bar]
주행거리	7.5	12.9	11.4	[km]
평균속도	24.91 (GPS speed)			[km/h]

그러나 Table 3의 결과와 같이 세 번에 걸친 공기 충전을 이용하여 주행한 거리가 31.8[km]에 불과한 것은 단위 거리 주행을 위해 많은 공기의 소모가 일어났기 때문이다. 이 문제를 해결하기 위해 다음의 공기 자동차 성능 향상에 기여할 수 있는 연구가 필요하다.

첫째, 주행테스트에 사용된 공기자동차는 차체 중량, 파워트레인 등이 최적화되지 않은 차량이다. 그리고 상용화를 앞둔 공기 엔진 모두 다단 팽창을 사용하고 있다는 점에서 압축공기 팽창의 다단화를 통해 주행에 사용되는 공기량을 줄여 최대 주행 거리를 늘일 수 있다. 둘째, 공기자동차를 구동시키기 위해 필요한 압축 공기 소모량을 줄이기 위해 저장 탱크와 엔진 사이에 감압되는 압력을 이용하여 최대 주행 거리를 늘일 수 있을 것이다. 감압 밸브에서는 탱크의 저장압으로부터 작동 압력까지 압력이 내려가는데, 이 때 강하되는 압력으로 터빈 및 압축기 그리고 열교환기 등을 작동시켜 손실되는 에너지를 최소화 할 수 있다. 이는 내연기관에서의 고온, 고압 배기가스를 이용한 터보차저(Turbo-Chager)와 같은 배기열 회수 시스템과 유사하며, 배기가스 회수 시스템 적용이 불가한 전기 자동차와 차별된 부분이다.

3.3 에너지 변환 효율 (Conversion Efficiency)

연료 탱크에 저장된 에너지는 엔진을 통해 운동 에너지로 변환된다. 이 때, 연료를 운동에너지로 변환(Conversion)시키는 과정이 존재하고 이 값이 클수록 같은 운동 에너지를 얻는데 필요한 연료가 적다. 이 점에 착안하여 에너지 변환 효율(Energy conversion efficiency)을 정의할 수 있으며, 투입된 에너

Table 4 Engine power output (model engine)

엔진 속도	1000	2000	3000	4000
출력 (PS)	8	18	30	40

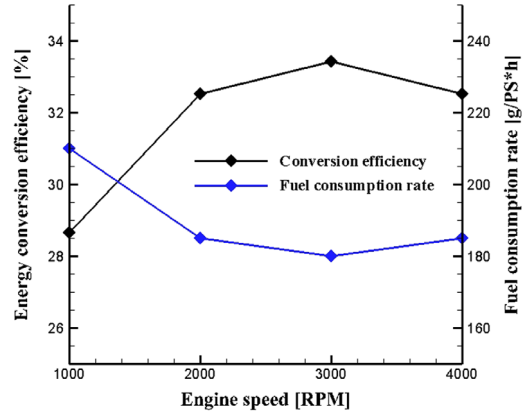


Fig. 6 Energy conversion efficiency (model engine)

지량이 실제 엔진 출력으로 변환된 비율에 해당한다. 엔진에 단위시간당 투입한 연료의 에너지량과 엔진이 내고 있는 출력을 비교하여, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_e = \frac{\text{엔진출력 } [W]}{\text{연료소모율 } \left[\frac{kg}{s} \right] \times \text{에너지밀도 } \left[\frac{J}{kg} \right]} \quad (1)$$

분석에 사용된 모델 엔진의 출력 정보는 Table 4와 같다. 이와 식 (1)을 이용하여 계산된 모델 엔진의 에너지 변환 효율을 Fig. 6에 도시하였다.

Fig. 6의 그래프에서 에너지 변환 효율은 회전 속도가 증가함에 따라 최대점을 가지는 이차 곡선의 개형을 가지며, 엔진속도 3,000[rpm] 부근에서 가장 높은 에너지 효율인 33.4[%]가 예측되었다. 압축 공기 엔진의 에너지 변환 효율을 내연 기관의 에너지 변환 효율과 비교하기 위해 Table 1의 제원과 Table 3의 주행 결과를 토대로 공기 자동차의 에너지 변환 효율을 얻었다.

효율 분석을 위해 주행 조건을 평지, 정속 주행으로 가정하였고 베어링 등 기타 마찰력을 제외한 주행에 영향을 미치는 저항력으로 구름저항(R_r , rolling resistance)과 공기저항(R_a , aerodynamic resistance)을 고려하였다. 이 때 구름저항과 공기 저항은 식 (2)와 식 (3)을 통해 얻을 수 있으며, 에너지 변환 효율 계산

Table 5 Energy conversion efficiency

구분	값	단위
내연기관	< 33.5	[%]
공기자동차	59.3	[%]

결과는 Table 5와 같다.

이 때, 모델 엔진과 공기 엔진 모두 연료 수송 과정을 고려하지 않았고, 충전된 연료를 소모하는 과정에서 투입된 열가 대비 얻는 출력을 기준으로 효율을 비교하였다.

$$R_r = fN \quad [N] \quad (2)$$

$$R_a = \frac{1}{2} C_d \rho A_f v^2 \quad [N] \quad (3)$$

공기 엔진의 에너지 변환 효율은 식 (1)과 비교하여 다음의 대응 관계를 가진다.

- 1) 엔진출력: 주행저항력($R_r + R_a$)과 Table 3에서 측정된 공기엔진의 평균 속도의 곱
- 2) 연료소모율: 충전된 압축 공기의 질량 및 압축 공기가 전량 소진되는데 걸린 시간
- 3) 에너지밀도: 엔진에 공급되는 압축공기가 가지는 에너지 밀도

Table 3과 같이 공기 자동차는 주행 속도가 낮기 때문에 식 (2)의 구름저항력이 지배적이다. 또한 <3.1 주행테스트> 항목에서 가장한 전면적이 실제값과 소폭 다르더라도 총 저항력(식 (2)와 식 (3)의 합)에 큰 영향을 주지 않는다.

Table 5의 결과에 의하면 공기자동차 에너지 변환 효율은 내연 기관보다 1.7배 높다. 또한 식 (2)와 식 (3)에서 고려하지 않은 여타 저항을 고려하면 공기 자동차의 실 효율은 이보다 소폭 높을 것으로 보인다. 이는 에너지 변환 과정 중에 고온에서 작동하는 내연 기관이 상대적으로 저온에서 작동하는 공기엔진보다 더 많은 손실이 발생한다는 것을 보여준다.

3.4 항속 효율 (Cruising Efficiency)

자동차는 연료를 이용하여 일정 거리를 이동하는 도구이다. 한번 연료를 충전하여 이동할 수 있는 거리가 길수록 주행 성능에 긍정적인 영향을 주며, 이 점에 착안하여 항속 효율(Cruising efficiency)을 정의할 수 있다. 이는 1회 연료 충전시 들어가는 에너

Table 6 Cruising efficiency

구분	값	단위
내연기관	7.020	[%]
공기자동차	11.770	[%]

지량과 1회 연료 충전으로 하는 일의 비로 나타낸 값으로, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_c = \frac{\text{주행저항} [N] \times 1\text{회 충전 후 이동} [m]}{1\text{회 충전 연료} [kg] \times \text{에너지밀도} \left[\frac{J}{kg} \right]} \quad (4)$$

비교 모델인 경형자동차는 CVS-75의 공인 연비 측정 방법으로 연비가 측정되었고, 그 값은 Table 1에 따라 20.9[km/liter]이다. 이 기준에 따르면 평균 속도 34.1[km/h]에서 주행한 결과를 토대로 연비를 산출하므로, 공인 연비 조건에서 1회 충전 연료를 전량 소모하는 거리를 구할 수 있다. 그리고 가솔린의 에너지 밀도를 열가(Heating Value)와 동일한 44 [MJ/kg] 으로, 공기저항계수를 약 0.35로 가정하여 항속 효율을 구할 수 있다.

같은 조건에서 공기 엔진의 항속 효율을 구할 수 있고 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 주행저항은 식 (2)와 식 (3)의 합을, 이동 거리는 Table 3의 값을 사용하였다. 이 때, 식 (4)에서 정의한 1회 충전연료와 에너지 밀도의 곱으로 나타내지는 부분은 식 (5)와 같이 대기압의 공기를 목표 압력(충전압력)으로 등온압축(Iso-thermal compression)할 경우 필요한 일로 정의하였다.

$$W_i = p V \ln \frac{V_2}{V_1} \quad [J] \quad (5)$$

Table 6에 의하면 공기 자동차가 내연기관보다 항속 효율이 4.7[%] 높다. 이는 공기 엔진이 내연기관보다 낮은 온도에서 동작하여 주행 중 발생하는 열 손실(에너지 손실)이 적기 때문이다.

3.5 비출력 (Specific Power)

항속 효율 뿐만 아니라 공기 엔진과 내연 기관의 가속 성능을 비교하기 위해 식 (6)과 같이 단위 배기량당 출력을 계산할 수 있다. 공기 엔진의 경우 Fig. 5에서 테스트된 최고속도인 54.7[km/h]에서 최대 출력이 기록된다 가정하였으며, 최소한 이 때의 구름

Table 7 Cruising efficiency

구분	값	단위
최대 출력	> 5.519	[kW]
단위 배기량당 출력	> 22.165	[kW/liter]

저항과 공기저항의 합산값 이상의 출력을 내고 있다고 판단하였다. 식 (2)와 식 (3)의 저항력과 주행 속도를 이용하여, 주행 테스트로 예측된 공기 엔진의 단위 배기량당 출력과 단위 출력당 질량을 계산한 결과는 Table 7과 같다.

$$N_L = \frac{N_E}{V_H} \left[\frac{kW}{l} \right] \quad (6)$$

Table 7에서의 최대 출력과 단위 배기량당 출력은 2륜 자동차의 경우와 비슷하며 공기 엔진은 내연 기관 대비 엔진의 구조가 간단하며 무게가 가볍기 때문에 단위 출력당 질량이 비교적 적다.

3.6 전기차와 비교 (Compare to E.V.)

이전 항목에서 구한 효율에 따르면 공기엔진은 내연기관보다 에너지 변환 효율 그리고 항속 효율에서 우위를 보인다. 그러나 현재 내연 기관의 대체 엔진으로 전기 자동차(E.V., Electric Vehicle)가 각광 받고 있으며, 이와 공기 엔진을 비교 평가할 필요가 있다. 비교를 위해 현재 국내에서 경형 자동차급 크기를 가지며 전기 자동차로 개발된 차종 중 하나를 택하였고 이 완성차 업체에서 제시하는 제원은 Table 8과 같다.

Table 8에서 제시한 전기차의 제원과 내연기관 그리고 공기 엔진의 효율을 비교하면 Table 9와 같다. 여기서 비교한 효율은 항속거리를 배터리 용량(전력량)으로 환산하여 나눈 값이며 이 값이 클수록 높은 성능을 나타낸다. 이 값은 그 정의에 의해 ‘항속 효율’과 유사한 의미를 가진다. 전기차와 비교를 위해 식 (4)의 계산 과정에서 주행 저항을 제외한 값을 비교하였다. 내연기관과 전기 자동차의 경우, 완성

Table 8 “Model” Electric vehicle specification

항목	값	단위
공차중량	1,185	[kg]
항속거리	135	[km]
최고속도	130	[km/h]

Table 9 Efficiency of three engines

항목	값	단위
내연기관	1.91	[km/kWh]
공기엔진	3.72	
전기자동차	7.09	

차 업체가 제공하는 공인 연비 및 공인 항속 가능 거리를 기준으로 하여 그 값을 산정하였으며, 공기 엔진의 경우 공인 주행 모드에서 테스트가 이루어지지 않았으나 주행 시 충분한 가속과 감속 등의 가혹 조건을 수행하였기 때문에 상대적으로 비교할만하다고 판단된다.

Table 9의 결과에 따르면, 공기 엔진은 내연기관보다 좋은 효율을 가지나, 전기자동차의 절반 가량의 효율을 가진다. 그러나 발전을 거듭해온 전기자동차에 비해 공기엔진의 연구가 미미하다는 점을 고려하면 개선의 여지가 있으리라 예측된다.

4. 결 론

본 연구에서는 하이브리드 형태가 아닌 고압의 압축 공기를 사용하는 순수 공기 엔진의 효율을 내연 기관과 비교 평가하였다. 공기 엔진은 충전, 팽창, 그리고 배기의 세 과정을 수행하여 외부에 일을 하며, 2행정으로 동작한다. 성능을 비교하기 위해 크기와 성능 면에서 가장 근접한 모델인 국산 경형 자동차와 전기 자동차를 선택하였고, 완성차 업체에서 제시한 제원을 토대로 성능을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 주행 저항과 연료의 에너지 밀도에 의한 엔진의 효율을 얻었으며 공기 엔진은 에너지 변환 효율에서 1.7배, 항속 효율에서 4.7% 정도 내연 기관보다 높은 값을 가진다.
- 2) 테스트된 공기 엔진의 비출력은 2륜 자동차의 경우와 비슷할 것으로 예상되며, 전기 자동차에 비해 항속 효율 절반 정도로 낮으나, 공기 엔진은 여러 엔진 중 가장 연구가 더딘 만큼 개선의 여지가 많다. 현재의 공기 엔진은 낮은 에너지 밀도로 인해 이동 가능 거리가 짧다는 것이 큰 단점이나 많은 연구를 통해 이를 해결할 수 있을 때 고효율 친환경 엔진으로 이용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 주식회사 포스코티엠씨의 산학 협력 과제의 일환으로 진행되었으며, 협조해 주신 주식회사 포스코티엠씨 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) V. A. Bogomolov, I. N. Kudryavtsev, A. I. Pyatak, S. I. Bondarenko, M. C. Plummer, A. V. Kramskoy and B. N. Murinets-Markevich, "Investigations of the Polytropic Exponent in the Working Process of a Pneumatic Engine," International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology(ISJAEE), Vol.24, No.4, pp.102-105, 2005.
- 2) I. N. Kudryavtsev, A. V. Kramskoy, A. I. Pyatak and M. C. Plummer, "Computer Simulation of Pneumatic Engine Operation," International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology(ISJAEE), Vol.23, No.3, pp.80-89, 2005.
- 3) Y. T. Shen and Y. R. Hwang, "Design and Implementation of an Air-powered Motorcycles," Applied Energy, Vol.86, No.7-8, pp.1105-1110, 2009.
- 4) F. Creutzig, A. Papson, L. Schipper and D. M. Kammen, "Economic and Environmental Evaluation of Compressed-air Cars," IOP Environmental Research Letters, Vol.4, No.4, 2009.
- 5) S. Trajkovic, P. Tunestal and B. Johansson, "Introductory Study of Variable Valve Actuation for Pneumatic Hybridization," SAE 2007-01-0288, 2007.
- 6) P. Brejaud, A. Charlet, Y. Chamaillard, A. Lvanco and P. Higelin, "Pneumatic-combustion Hybrid Engine: A Study of the Effect of the Valvetrain Sophistication on Pneumatic Modes," Oil & Gas Science and Technology, Vol.65, No.1, pp.27-37, 2010.