에너지공학, 제25권 제4호(2016)
Journal of Energy Engineering, Vol. 25, No. 4, pp.170~175(2016)
https://doi.org/10.5855/ENERGY.2016.25.4.170

스크롤 팽창기를 적용한 압축공기 엔진 자동차의 주행거리 특성에 관한 연구

신동길†
한국기계연구원
(2016년 8월 23일 접수, 2016년 10월 21일 수정, 2016년 10월 25일 채택)

A Theoretical Study on Driving Distance of Compressed Air Vehicle Using Scroll Expander

Donggil Shin†
Department of Engine Research, Korea Institute of Machinery & Materials
(Received 23 August 2016, Revised 21 October 2016, Accepted 25 October 2016)

요 약

현재 자동차의 주요 동력원은 내연기관이 가장 많은 비중을 차지하고 있다. 내연기관 자동차로 인한 환경문제를 해결하기 위한 친환경 자동차로는 하이브리드 자동차, 전기 자동차 및 공기 엔진 자동차 등을 들 수 있다. 배터리를 이용하는 하이브리드 차나 순수 전기차 등도 아직은 크지 않으나 점차 많은 비중을 차지하여 나가고 있다. 전기모터를 사용하는 전기차에 비해 압축공기를 이용하는 공기 엔진 자동차는 아직은 연구개발이 거의 이루어지지 않은 상태이다. 본 논문에서는 스크롤 팽창기를 적용하는 새로운 압축공기 엔진을 소개하고, 이 엔진을 장착한 자동차의 주행거리 가능 거리를 이론적으로 산출하였다.

주요어 : 압축공기 엔진, 스크롤 팽창기, 주행거리, 공기저장탱크

Abstract - An internal combustion engine is the most widely used power source for an automobile. In order to resolve environmental problems resulting from the use of internal combustion engines, environmentally friendly automobiles such as hybrid, electric, and air-engine vehicles are being developed. The share of hybrid vehicles using battery or pure electric vehicles, which are not popular, is gradually increasing. Compared to an electric vehicle, which uses an electric motor, air-engine vehicles, which use compressed air, have hardly been developed. In this study, a compressed air engine with a scroll expander is introduced, and the potential mileage of an automobile utilizing this engine is theoretically calculated.

Key words : Compressed air engine, Scroll expander, Driving distance, Air storage tank

1. 서 론

현재 자동차의 주요 동력원은 내연기관이 가장 많은 비중을 차지하고 있다. 내연기관은 화석연료를 연소하는 과정에서 유해 배출가스를 배출하여 스모그, 미세먼지 등으로 대기환경에 악영향을 주며, 여러 후처리 장치 들이 적용되고 있지만 완전 무공해를 실현하는 것은 불가능하다. 내연기관 자동차로 인한 환경문제를 해결하기 위한 친환경 자동차로는 전기 자동차 및 압축공기 엔진 자동차 등을 들 수 있다. 배터리를 이용하는 하이브리드 차나 순수 전기차 등도 아직은 크지 않으나 점차 많은 비중을 차지하여 나가고 있다. 전기차는 대용량의 배터리 수명이 다하면 폐기하는

†To whom corresponding should be addressed.
Tel : 042-868-7387 E-mail : sdk@kimm.re.kr

과정에서 중극속으로 인한 심각한 환경 오염을 일으킬 수 있는 문제가 있다. 압축공기 엔진 자동차는 유해배기가스도 배출하지 않을 뿐만 아니라 환경 오염을 일으키지 않는 고청정 자동차라 할 수 있다. 전기차에 비해 압축공기를 이용하는 공기 엔진 자동차는 아직은 연구개발이 거의 이루어지지 않은 상태이다. 압축공기 엔진은 구조가 간단하고 유지 보수가 저렴하며, 안정성이 요구되는 분야나 불꽃에 의한 폭발위험성이 있는 극한환경에서 적용될 수 있다.(1)

I. N. Kudryavtsev 등은 압축공기 엔진의 성능을 분석하기 위해 왕복동 타입의 압축공기 엔진 작동을 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 하였다.(2) Chi-Min Liu 등은 작은 실린더와 큰 실린더로 구성된 2 단계 팽창 왕복동 엔진을 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션하고 실험을 수행한 결과 단일 실린더보다 성능이 우수하다는 결론을 얻었다.(3) Shen 등은 압축 공기를 연료로 하는 125cc 배기량의 베인 에어 모터(Vane air motor) 방식의 엔진을 장착한 오토바이로 주행시험을 한 결과 시속 20 km에서 70[%]의 효율을 보였다.(4)

본 논문에서는 스크롤 팽창기를 적용하는 새로운 압축공기 엔진을 소개하고, 이 엔진을 장착한 자동차의 주행거리 가능 거리를 이론적으로 산출하였다.

2. 스크롤 팽창기 적용 압축공기 엔진 자동차

2-1. 스크롤 팽창기

스크롤 팽창기는 주로 유기랭킨사이클 시스템의 동력을 회수하기 위한 용도로서 활용되거나 연구개발 되어져 왔으며. 간단한 구조를 가장 큰 장점으로 가진다.

또한, 스크롤 팽창기는 왕복동 방식의 팽창기에 비해 고효율, 저소음 및 저진동, 소형 및 경량의 장점을 가지고 있으며, 형상은 Fig. 1과 같다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 고정 스크롤 중심부(Suction Port)로 고압의 가스가 유입되면 선회 스크롤를 가스압력으로 밀어내면서 팽창이 이루어지고 고정 스크롤의 원주로 토출되면서 선회스크롤의 선회 운동에 의한 동력이 발생하게 된다.(5)

2-2. 스크롤 팽창기 적용 압축공기 엔진 자동차

스크롤 팽창기 적용 압축 공기엔진 자동차 개념도를 Fig. 3에 나타내었다. 공기엔진 자동차는 스크롤 팽창기, 압축공기 저장용기, 클러치, 변속장치, 공기유량 조절 밸브, 감압 밸브(regulator) 및 이들 구성부품들을 제어하기 위한 전자제어장치(ECU) 등으로 구성된다. 압축공기 저장용기에는 고압의 압축공기가 저장되어 있고, 감압 밸브는 압축공기가 스크롤 팽창기로 유입 시 적정압력으로 조절하는 역할을 한다. 공기유량 조절 밸브는 스크롤 팽창기가 운전자의 의도에 해당하는 적정 출력을 낼 수 있도록 공기량을 조절하는 기능을 수행한다. 클러치는 차량 가속시에만 차축과 팽창기가 연결되어 있도록 하고, 변속기는 차축 회전수와 스크롤 팽창기가 최적화된 비율을 가지도록 하는 역할을

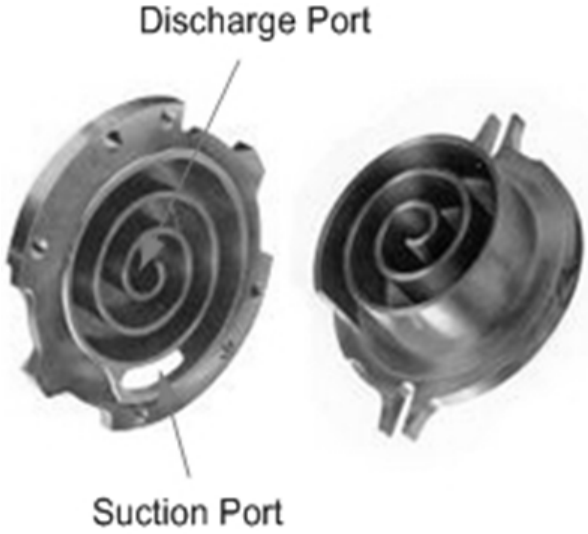

Fig. 1. Scroll compressor and scroll shape

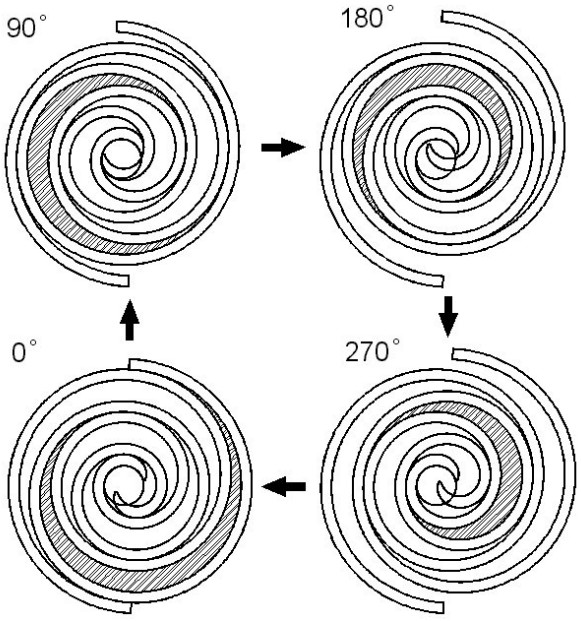

Fig. 2. Gas compression process (reverse process, expansion)

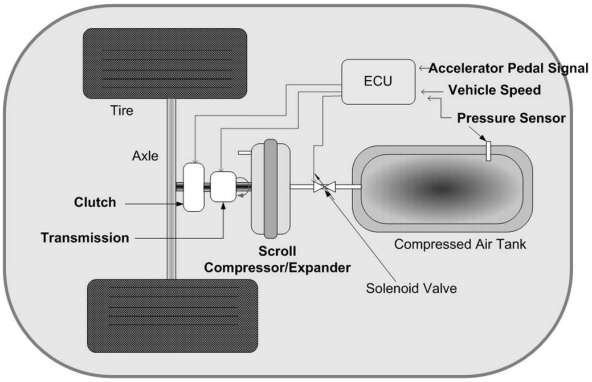

Fig. 3. Schematic Diagram of Scroll Type Air Engine Vehicle

수행한다. 통상 스크롤 팽창기의 회전수는 1000~3000 rpm 영역에서 최대 효율을 나타내고, 차축은 수백 rpm 수준이므로 적절한 변속비를 맞추는 것이 차량의 전체 효율이 높임에 있어 중요한 사항이다.

운전자가 가속 페달을 밟아 전자제어장치에 가속 페달 신호가 전달되면 전자제어장치는 클러치를 작동시켜 차축과 스크롤 기기를 연결하고 압축공기가 스크롤 팽창기로 유입될 수 있도록 솔레노이드 밸브를 개방한다. 스크롤 기기는 팽창기로서 작동되면서 유입된 압축공기를 팽창시켜 차량이 가속되기 위한 동력을 제공한다.

3. 주행가능거리 산출

스크롤 팽창기가 적용되는 공기 엔진 자동차의 주행가능 거리를 산출하고자 한다. 계산은 크게 2단계를 거쳐 수행되며, 먼저, 스크롤 팽창기의 팽창 과정에서 발생하는 일 및 압축공기 방출에 의한 저장용기의 공기 질량 변화등을 열역학적으로 모델링하고, 2 번째 단계에서는 모델링 된 결과 식을 차량 동력학과 연계하여 시뮬레이션 하고자 한다.

3-1. 압축공기 엔진의 열역학적 모델링

스크롤 팽창기에 의한 공기의 팽창과정이 짧은 시간에 급속히 이루어지므로 팽창 과정은 공기의 등엔트로피 과정(Isentropic process)으로 가정할 수 있으며, 스크롤 적용 압축공기 엔진의 열역학적 모델링을 위해 다음과 같이 가정을 한다.

- 스크롤 팽창기의 팽창은 가역단열과정
- 스크롤 팽창기의 입구압력은 20 bar로 선정
- 스크롤 팽창기 효율은 70%로 선정

압축공기의 단열팽창에 의한 스크롤 팽창기의 일은 아래와 같이 나타낸다.

$$w_{\exp,is} = h_i - h_{o,is}$$
$$w_{\exp} = \eta_e w_{\exp,is}$$
$$\dot{W}_{\exp} = \dot{m}_{\exp} w_{\exp}$$

여기서, $w_{c,is}$는 가역 단열 과정시의 단위 질량당 팽창기가 수행한 일이다. 스크롤 팽창기 입구 질량유량 $\dot{m}_{\exp}$는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\dot{m}_{\exp} = \frac{\rho_{in} V_{in} N}{60}$$

여기서, V_{in}은 팽창기 형상에 의해 결정되는 행정체적으로서, 팽창기 1회전당 흡입부피이고, N은 팽창기 분당 회전수이다.

압축공기 저장 용기가 저장하고 있는 압축공기의 질량은 다음의 식과 같이 나타낸다.

$$m_t = m_0 - \int \dot{m}_{\exp} dt$$

여기서, m_o는 주행시작 전 압축공기 저장용기에 저장된 압축공기 초기 질량이다. 스크롤 팽창기 작동시간 동안 질량유량이 일정하다고 가정하면, 위의 식은 아래와 같이 나타내어진다.

$$m_t = m_0 - \dot{m}_{\exp} t_{\exp}$$

위의 식을 팽창기 작동시간에 대한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$t_{\exp} = \frac{(m_o - m_t)}{\dot{m}_{\exp}}$$

주행거리 종료 시점인 팽창기 최대 작동시간은 아래의 식과 같다.

$$t_{\exp,\max} = \frac{(m_o - m_{t,\min})}{\dot{m}_{\exp}}$$

여기서, $m_{t,\min}$은 주행종료 시점의 압축공기 저장용기의 최소질량이며, 최소압력인 7 bar를 기준으로 한다.

압축공기가 최소량까지 소진될 때까지 주행동력으로 발생시킨 총 에너지는 다음 같이 표현될 수 있다.

$$E_{air} = \dot{W}_{\exp} t_{\exp,\max}$$

3-2. 차량 동력학 모델링

주행하는 차량의 운동방정식은 아래의 식과 같으며, 차량의 관성력은 구동력과 저항력의 차이로 계산된다.[4)]

$$M_v \frac{dv}{dt} = F_{traction} - F_{resistance}$$

여기서, $F_{traction}$은 차량의 구동력이며, 스크롤 팽창기에서 발생된다. $F_{resistance}$는 차량의 저항력이며, 구름저항력, 공기저항력 및 구배저항력으로 구분된다. 여기서, 도로의 경사각은 영도로 가정하여 구배저항은 없는 조건이다. 따라서, 저항력은 아래와 같이 정리된다.

$$F_{resistnace} = F_r + D_a$$

구름저항은 아래의 식과 같이 표현되며, P는 차량 중량이고, f_r은 구름저항 계수이며 v는 차량속력이다. 차량속력 130 km/h 이하에서는 아래의 식을 사용하여 구름저항계수의 계산이 가능하다.

$$F_r = P\ f_r$$

$$f_r = 0.01(1 + \frac{v}{100})$$

공기저항은 아래의 식과 같이 표현된다.

$$D_a = \frac{1}{2} A \cdot C_d \cdot \rho \cdot v^2$$

여기서, A는 차량의 전면 투영면적이고, C_d는 공기저항계수이며, ρ는 공기밀도이다.

차량이 정속주행 중이면, 차량 운동방정식은 다음 식을 만족한다.

$$F_{traction} = F_{resistance}$$

위 운동방정식을 힘이 아닌 동력의 형태로 나타내기 위해, 양변에 순간 속력 v를 곱하면 아래의 식으로 표현된다.

$$\dot{E}_{traction} = \dot{E}_{resistance}$$

위식에 주행시간 t_d를 양변에 곱하면 좌우변은 아래와 같이 에너지 식으로 바뀐다.

$$E_{traction} = E_{resistance}$$

3-3. 주행거리 시뮬레이션

스크롤 팽창기의 구동력은 저항력 보다 커야 차량의 출발 및 주행이 가능하다. 주행중에는 스크롤 팽창기가 계속해서 작동될 필요는 없으며, 차량이 일정한 속력을 유지하기 위한 구동동력만을 발생시키면 된다.

압축공기에 의해 발생된 총 구동에너지는 차량을 주행시키는 에너지 또는 저항 에너지와 등가이며, 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{air} = E_{traction} = E_{resistance}$$

$$E_{air} = \dot{W}_{\exp} t_{\exp,\max} = \dot{E}_{resistance} t_d$$

따라서, 스크롤 팽창기가 작동한 시간과 차량이 주행한 시간은 차이가 발생하게 된다. 압축공기가 최저량에 도달하는 시점까지 차량이 주행한 시간은 아래의 식에 의해 계산된다.

$$t_d = t_{\exp,\max} \frac{\dot{W}_{\exp}}{\dot{E}_{resistance}}$$

총 주행거리는 다음과 같이 계산된다

$$S = v t_d$$

공기 저장탱크 용량, 압력별 주행속력별로 주행거리를 계산하기 위한 대상 차량의 제원을 Table 1에 나타내었다.

Table 2의 3가지 경우에 대한 주행거리를 계산하였으며, 주행속력은 정속주행 조건을 가정한다.

Fig. 4는 Case-1의 결과를 나타낸다. 용기 용량에 정비례하여 주행거리가 늘어남을 알 수 있다. 주행거리는 압력용기 용량이 50 L일 때 최소 약 8 km 주행거리이며, 용량이 200 로 증가하면, 주행거리는 약 32

Table 1. The vehicle specificaition

항목	값
공차중량	1000 kg
전면투영면적	1.2 m^2
항력계수	0.32

Table 2. Test condition

Case -1	
주행속력	50 km/h
공기 압력	200 bar
용기 용량	50~200 L 변화
Case -2	
주행속력	50 km/h
공기 압력	50~200 bar 변화
용기 용량	150 L
Case -3	
주행속력	5~100 km/h 변화
공기 압력	200 bar
용기 용량	150 L

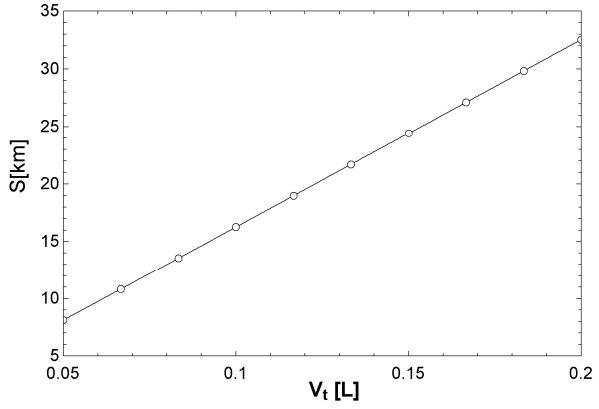

Fig. 4. Driving distance change for air tank volume

km 주행거리를 나타낸다.

Fig. 5는 Case-2의 결과를 나타낸다. 공기저장 용기 압력이 늘어남에 따라 주행거리가 정비례하여 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6는 Case-3의 결과를 나타낸다. 주행속력이 증감함에 따라 주행거리가 감소함을 나타낸다. 이는 주

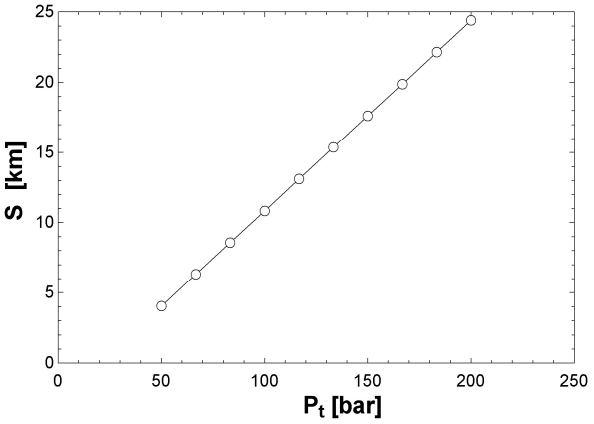

Fig. 5. Driving distance change for air tank pressure

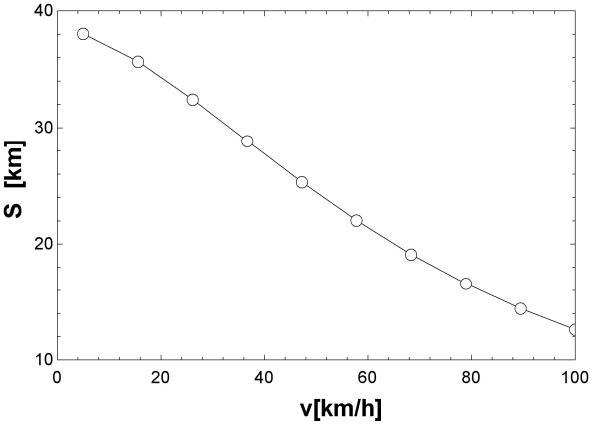

Fig. 6. Driving distance change for vehcile speed

행속력이 증가하면 구름저항 및 공기 저항이 증가하기 때문이다.

4. 결 론

본 논문에서는 스크롤 팽창기를 이용하는 공압식 엔진을 장착한 자동차를 소개하고, 공기 저장용기 압력, 용량 및 주행속력 별 주행거리를 이론적으로 산출하였다. 이론적으로 분석하여 본 결과 저속조건에서는 30 km 이상의 주행거리를 달성할 수 있을 것으로 보인다. 내연기관 자동차에 비해 주행거리가 짧으나, 배출가스를 전혀 배출하지 않는 친환경성의 장점이 있어, 소형 운반차, 작업차 및 골프카 등에 적용성이 있는 것으로 판단된다. 향후 압축공기 엔진의 효율성 향상 및 주행거리를 늘리기 위한 연구개발이 필요하다고 판단된다.

References

1. Jaehyeon Park, Jehyun Baek, “Evaluation of the Energy Efficiency of the Air Engine”, KSAE, Vol. 23, No.5, pp. 494-501, 2015.
2. I. N. Kudryavtsev, A. V. Kramskoy, A. I.Pyatak and M. C. Plummer, “Computer Simulation of Pneumatic Engine Operation,” International Scientific Journal for AlternativeEnergy and Ecology(ISJAEE), Vol.23, No.3, pp.80-89, 2005.
3. Chi-Min Liu, Chin-Lun Huang, Cheng-Kuo Sung, Chih-Yung Huang, “Performance analysis of a two-stage expansion air engine”, Energy, vol.115, pp.140-148, 2016.
4. 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.
5. Youngmin Kim, Dongkil Shin, Janghee Lee, Kwenha Park, “Noble Stirling Engine Employing Scroll Mechanism”, Proceedings of the 11th International Stirling Engine Conference, pp. 67-75, 2003.
6. Richard E. Sonntag, Introduction to Thermodynamics, 1982.1. Hong, G. D., 2002, The experimental studies of vacuum residue combustion in a small scale reactor, KOSEE, Vol. 6, No. 2, pp. 19-30