

스크롤 기기 이용 공압식 회생제동시스템의 연비향상 효과에 관한 연구

신동길[†] · 김영민 · 김용래

한국기계연구원

(2011년 8월 1일 접수, 2011년 11월 28일 수정, 2011년 12월 2일 채택)

A Theoretical Study on Fuel Economy Improvements by Pneumatic Type Braking Energy Regeneration System Using the Scroll Mechanism

Donggil Shin[†], Youngmin Kim and Yongrae Kim

Engine R&D Group, Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 1 August 2011, Revised 28 November 2011, Accepted 2 December 2011)

요 약

하이브리드 자동차는 전기방식 회생제동을 이용하여 연비가 우수하다. 본 논문에서는 새로운 공압식 회생제동 장치를 소개하였다. 공압식 회생제동장치는 압축과 팽창기능을 동시에 가지는 스크롤 기구를 이용한다. 차량 감속시에는 스크롤 기구는 압축기로 작동되면서 대기중의 공기를 압축하여 압축탱크에 저장한 후 차량 가속시에는 스크롤기구가 팽창기로 작동되면서 탱크에 저장된 압축공기가 차량 운동에너지로 활용된다. 회생제동장치를 사용함으로써 개선되는 연비를 분석하기 위해, CVS-75 모드 주행조건에서 시뮬레이션을 수행하였다.

주요어 : 회생제동, 공압 방식, 스크롤, 압축, 팽창

Abstract— The hybrid vehicle has a good fuel economy with a electric type braking energy regeneration system. This paper introduced a novel pneumatic type braking energy regeneration system. The novel system use a scroll mechanism which have both compression function and expansion function. While vehicle is decelerating, the scroll machinery, being operated as a scroll compressor, compress a atmospheric air to save the vehicle's kinetic energy and reuse a compressed air which is reserved in a air tank while vehicle is accelerating. In order to analyze fuel improvements by applying braking energy regeneration system to a vehicle, we simulated the rate of braking energy regeneration through CVS-75 mode driving patterns.

Key words : Braking Energy Regeneration, Pneumatic Type, Scroll, Compression, Expansion

Nomenclature

\dot{W} : power, kW

P : pressure, bar

\dot{m} : mass flow rate, kg/s

V : volume, m^3 or vehicle speed, m/s

T: temperature, °C

ρ : density, kg/m^3

η : efficiency

Subscripts

comp, exp : compression, expansion

t : tank

a : atmospheric condition

regen : regeneration

[†]To whom corresponding should be addressed.

Engine R&D Group, Korea Institute of Machinery & Materials,
171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea
Tel : 042-868-7387; E-mail : sdk@kimm.re.kr

1. 서 론

자동차 연비향상을 위한 회생제동 장치에는 전기 방식, 유압 방식 및 플라이 휠 방식으로 분류된다 [1]. 기존의 시스템들은 연비를 개선하고 배출가스를 감소시킬 수 있지만 장치가 복잡하거나 고가이기 때문에 자동차 가격을 현격히 상승시키고 있다. 본 논문에서는 기존 회생제동 장치들의 단점을 극복할 수 있는 새로운 공압식 회생제동 장치를 소개하고, 이 장치의 연비 개선 효과를 이론적으로 분석하였다. 공압식 회생제동 장치는 자동차의 제동에너지를 압축공기형태로 저장하고, 가속시에는 저장된 압축공기를 팽창시켜 동력을 얻으며, 공기의 압축·팽창은 스크롤 기구를 이용한다. 공압식 회생제동 시스템의 실용화 가능성 및 필요성을 판단하기 위해, 중형급 승용자동차를 대상으로 자동차 공인연비 시험방법인 CVS-75 모드 주행조건에서의 제동에너지 회생율과 연비 상승효과를 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2. 공압식 회생제동 시스템

2-1. 시스템 개요

공압식 회생제동 시스템의 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 시스템은 스크롤 기구, 압축공기 저장용기, 클러치, 변속장치, 솔레노이드 밸브 및 이들 구성부품을 제어하기 위한 전자제어장치(ECU) 등으로 구성된다. 제동시의 시스템 동작을 Fig. 2에 나타내었다. 운전자가 브레이크 페달을 밟아 전자제어장치에 브레이크 페달 신호가 전달되면 전자제어장치는 클러치를 작동시켜 차축과 스크롤 기구를 연결하고, 스크롤

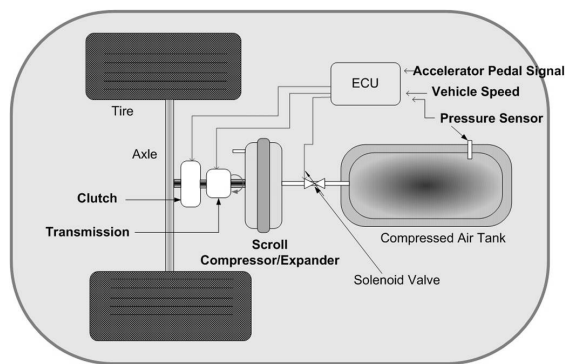


Fig. 1. Schematic Diagram of Pneumatic Type Braking Energy Regeneration System.

기구는 압축기로서 작동되면서, 압축 부하가 차량의 제동력으로 작용하게 되어 차량을 감속시킨다. 이때, 스크롤 압축기는 대기 중의 공기를 고압으로 압축하여 압축공기용기에 저장한다. 한편, 전자제어장치는 스크롤 압축기가 적절한 회전수에서 동작되도록 변속장치를 제어한다.

가속시의 시스템 동작을 Fig. 3에 나타내었다.

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

스크롤 팽창기가 정상적인 성능을 발휘하기 위해 가속 페달신호가 전자제어장치에 전달되더라도 압축

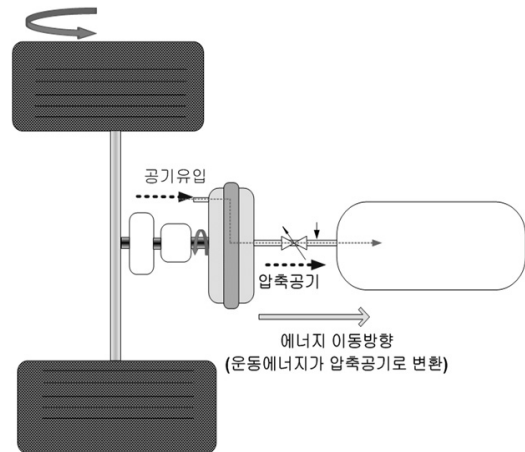


Fig. 2. Braking mode.

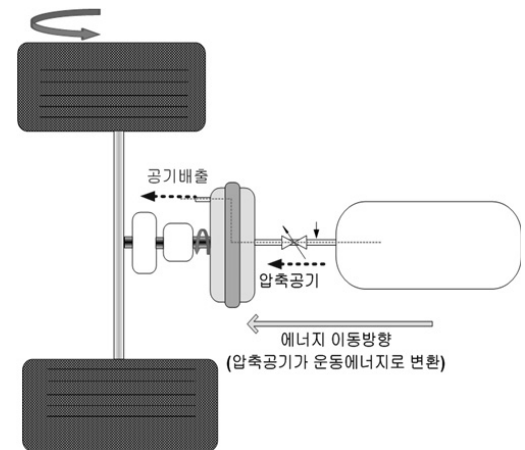


Fig. 3. Acceleration mode.

공기 저장용기의 압력이 일정 수준이하로 떨어지면 스크롤 팽창기가 동작되지 않도록 제어한다.

2-2. 스크롤 기기 원리

스크롤 기기는 고효율, 저소음 및 저진동, 소형 및 경량의 장점을 가지고 있으며 현재 냉동이나 공기 압축기로 널리 사용되고 있다. 스크롤 압축기의 형상은 Fig. 4와 같다. Fig. 5와 같이 고정 스크롤의 원주에 위치한 흡입구(Suction Port)를 통하여 가스가 스크롤 내부로 유입되면 선회 스크롤의 선회운동에 의해 초승달 모양의 밀폐공간이 중심부로 이동되면서 밀폐공간의 체적이 작아지고 가스는 압축되어 고정스크롤 중심부의 토출구(Discharge port)로 배출된다. 스크롤 팽창기는 압축기와는 반대로 고정 스크롤 중심부로 고압의 가스가 유입되면 선회 스크롤을 가스압력으로 밀어내면서 팽창이 이루어지고 고정 스크롤의 원주로 토출되면서 선회스크롤의 선회 운동에 의한 동력이 발생하게 된다 [2].

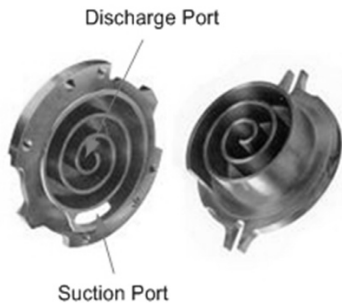


Fig. 4. Scroll compressor and scroll shape.

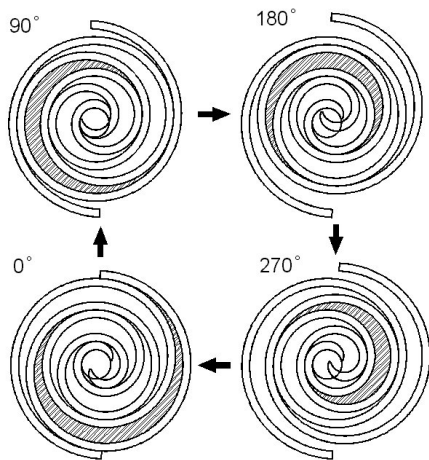


Fig. 5. Gas compression process (reverse process, expansion).

3. 연비향상 효과 시뮬레이션

스크롤기기가 적용되는 회생제동 시스템을 중형급 승용자동차에 장착하여 실 도로를 주행 했을 때 연비 개선이 어느 정도 이루어지는 분석하기 위해 먼저, 스크롤 기기의 압축·팽창 과정에서 발생하는 일 및 압축공기의 유입·방출에 의한 저장용기의 온도, 압력 변화 등을 열역학적으로 모델링하고, 모델링 된 결과식을 CVS-75 주행조건에 대입하여 연비향상 효과를 시뮬레이션 하고자 한다.

3-1. 시스템 열역학적 모델링

스크롤 기기에 의한 공기의 압축·팽창과정이 짧은 시간에 급속히 이루어지므로 압축·팽창 과정은 공기의 등엔트로피 과정(Isentropic process)으로 가정할 수 있으며, 회생제동시스템의 열역학적 모델링을 위해 다음과 같이 가정을 한다.

- 스크롤 기기의 압축·팽창은 가역단열과정
- 스크롤 기기의 압축비 P_{ratio} 는 10으로 선정
- 공기의 유동에 의한 운동에너지 및 위치에너지는 무시
- 작동 유체는 공기로서 이상기체
- 압축공기 저장용기 및 배관은 단열

위와 같은 전제조건에서 공기의 압축·팽창과정에 의한 일은 개방시스템의 축일 식을 적용하여 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다 [5].

$$w_{comp} = \int v dP = \frac{nR}{n-1} (T_{comp} - T_a), (n = 1.4)$$

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_{com} w_{comp}$$

$$w_{exp} = - \int v dP = - \frac{nR}{n-1} (T_{exp} - T_t), (n = 1.4)$$

$$\dot{W}_{exp} = \dot{m}_{exp} w_{exp}$$

압축공기 저장 용기의 압력, 온도 및 체적은 다음 식과 같이 이상기체 상태방정식으로 나타낸다.

$$P_t = \frac{m_t R T_t}{V_t}$$

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

여기서, m_o 는 주행시작 전 압축공기 저장용기에 저장된 압축공기 질량이다.

감속시 압축기가 작동되어 고온의 압축공기가 저장용기로 유입되어 저장용기 내의 온도가 상승하게 되며, 반대로 가속시에는 고온의 압축공기가 토출되어 나오면서 용기의 온도가 떨어지게 되는데, 압축공기 유·출입의 온도변화는 비정상유동 에너지 방정식에 의해 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{dE_t}{dt} = \dot{m}_{comp} C_p T_{comp} : \text{압축공기 유입}$$

$$\frac{dE_t}{dt} = -\dot{m}_{exp} C_p T_t : \text{압축공기 배출}$$

여기서, $E_t = m_t C_v T_t$

3-2. 차량주행 운동특성 모델링

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

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

차량에 가해지는 저항력은 구름저항, 공기저항 및 구배저항으로 구분된다.

구름저항은 아래의 식과 같이 표현되며, P 는 차량 중량이고, f_r 은 구름저항 계수이며 V 는 차량속력이다. 차량속력 130 km/h 이하에서는 아래의 식을 사용하여 구름저항계수의 계산이 가능하다.

$$F_r = P f_r$$

$$f_r = 0.01 \left(1 + \frac{V}{100} \right)$$

공기저항은 일반적으로 아래의 식과 같이 표현된다.

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

여기서, A 는 차량의 전면 투영면적이고, C_d 는 공기 저항계수이며, ρ 는 공기밀도이다.

CVS-75 모드 주행에서는 구배저항은 없는 것으로 가정하면, 차량의 관성력은 아래의 식으로 정리된다.

$$M_v \frac{dV}{dt} = F_{traction} - \left(0.01 \cdot P \cdot \left(1 + \frac{V}{100} \right) + \frac{1}{2} \cdot A \cdot C_d \cdot \rho \cdot V^2 \right)$$

위 운동방정식을 힘이 아닌 동력의 형태로 나타내면 각 항목에 순간 속력 V 를 곱하여 아래의 식으로 표현된다.

$$M_v \cdot V \cdot \frac{dv}{dt} = F_{traction} \cdot V - P \cdot V \cdot \left(0.01 \left(1 + \frac{V}{100} \right) + \frac{1}{2} \cdot A \cdot C_d \cdot \rho \cdot V^3 \right)$$

위식은 아래의 식과 같이 구동동력과 구름저항 및 공기저항 등에 의한 손실동력의 항으로 표현할 수 있다.

$$\dot{W}_t = \dot{W}_{traction} - (\dot{W}_{roll} + \dot{W}_{air})$$

3-3. 시뮬레이션

제동에너지 회생시스템을 차량에 장착하여 주행하였을 때 연비가 어느 정도 개선되는지 파악하기 위해 대표 주행조건을 Fig. 6과 같은 CVS-75 모드를 선정하여 시뮬레이션을 수행하였다. CVS-75 모드는 북미, 남미 국가, 한국, 대만, 스웨덴 등에서 이용되는 자동차 배출가스 및 연비 측정 모드로서 정지가동(Idle), 감속, 가속이 반복 되는 주행 과정을 대표화한 주행패턴이며, 평균차속은 34 km/h이고, 총 주행거리는 17.85 km이다 [3]. Fig. 6의 CVS-75 모드 주행조건은 시간별 차속을 도시한 것으로서 차속을 1초 단위로 표시한다. 주행 시뮬레이션 과정을 단순화하기 위해 주행하는 동안 1초간의 가속도는 일정한 것으로 가정한다. 따라서 차량가속도는 1초 동안의 차속차이로 계산된다.

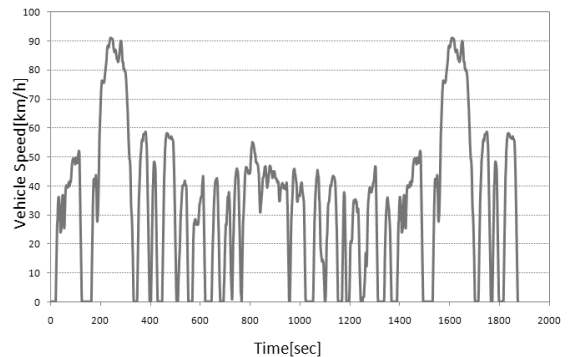


Fig. 6. CVS-75 mode driving pattern.

CVS-75 모드 에서의 연비개선 효과에 대한 스크롤 기기 효율 및 대상 차량 등의 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- $V_t = 30L$
- 스크롤 압축기 효율 $\eta_{comp} = 0.8$
- 스크롤 팽창기 효율 $\eta_{exp} = 0.8$
- 차량중량 $P=1600 \text{ kg}$ 중
- 전면투영면적 $A = 1.8m^2, C_d = 0.32$

시뮬레이션 과정을 Fig. 7에 플로우차트(Flowchart)로 나타내었다. 시뮬레이션은 1초 단위로 수행되고 계산이 종료되면 다음 1초로 넘어가서 다음 연산을 차량주행 시간 흐름 방향으로 순차적으로 수행한다. 시뮬레이션 첫 단계에서는 운전자의 가속 여부 판단하는 것으로 시작한다. 운전자의 가속 여부 판단은 구동동력의 부호를 기준으로 하는데, 운전자가 브레이킹 페달을 밟아 감속할 때는 차량에서 발생하는 구동동력이 음(-)의 값을 가지게 되고 가속페달을 밟아 가속할 때는 구동동력이 양(+)의 값을 가지게 된다. 스크롤 기기를 작동하여 가속·감속할 때는 구동동력의 일부를 스크롤 기기가 담당하게 되는데 이 때의 동력 변환 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{If. } \dot{W}_{traction} > 0, \quad \dot{W}_{expand} &\Leftrightarrow \dot{W}_{traction} \\ \text{If. } \dot{W}_{traction} < 0, \quad \dot{W}_{traction} &\Leftrightarrow \dot{W}_{comp} \end{aligned}$$

감속시 제동동력이 압축기 구동동력으로 전환되어 압축공기 용기에 저장되는 동력간의 관계는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_{store} &= \dot{W}_{comp} = \eta_{comp} \dot{W}_{traction} \\ \dot{W}_{comp} &= \dot{m}_{comp} w_{comp} \end{aligned}$$

위 식들을 조합하면 스크롤 압축기 작동에 의해 저장용기에 유입되는 공기의 질량유량 및 압축공기로 저장되는 에너지의 관계를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{comp} &= \eta_{comp} \frac{\dot{W}_{traction}}{w_{comp}} \\ \dot{W}_{store} &= \dot{m}_{comp} w_{comp} \end{aligned}$$

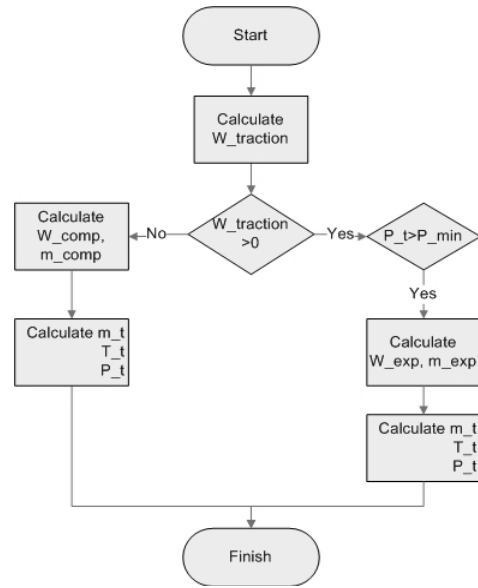


Fig. 7. Driving Simulation flowchart ($\Delta t = 1 \text{ sec}$).

가속시 저장되었던 압축공기가 스크롤 팽창기에 의해 소모되는 동력이 차량의 구동동력으로 변환되는 관계는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_{regen} &= \eta_{exp} \dot{W}_{exp} = \dot{W}_{traction} \\ \dot{W}_{exp} &= \dot{m}_{exp} w_{exp} \end{aligned}$$

위 식들을 조합하면 팽창기 작동에 의해 저장용기에서 배출되는 공기의 질량유량 및 재생되는 에너지와의 관계를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{exp} &= \frac{1}{\eta_{exp}} \frac{\dot{W}_{traction}}{w_{exp}} \\ \dot{W}_{regen} &= \eta_{exp} \dot{m}_{exp} w_{exp} \end{aligned}$$

압축공기 저장용기는 CVS-75 모드 주행 전에는 완전히 비어있어 압력은 대기압이고, 온도는 20°C 인 것으로 가정한다.

압축공기 저장용기의 최저압력 P_{min} 은 10 bar로 설정하여 10 bar 미만이면 스크롤 기기는 팽창기로서 작동되지 않도록 제어한다. 따라서, 스크롤 팽창기를 작동하여 압축공기를 구동동력으로 활용하는 조건은 $\dot{W}_{traction} > 0$ 이면서 $P_t > P_{min}$ 인 조건이고, 차량의 제동에너지를 압축공기 형태로 저장할 때는 $\dot{W}_{traction} < 0$ 인 조건이다.

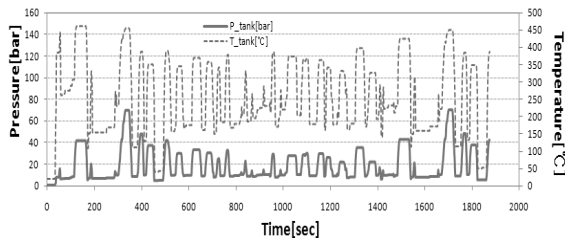


Fig. 8. Air tank pressure, temperature variation during the cycle.

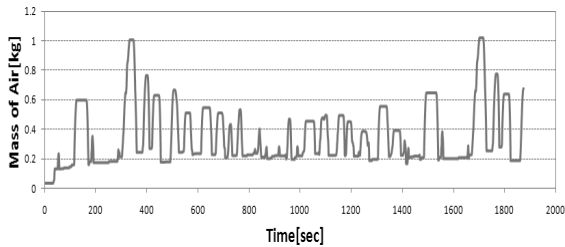


Fig. 9. Air mass variation during the cycle.

Fig. 8은 주행하는 동안 압축공기 유·출입에 의한 압축공기 저장용기의 압력, 온도를 나타내고, Fig. 9는 압축공기 저장용기에 저장된 공기의 질량 변화를 도시한 것이다.

주행시작 후 초기에는 저장용기가 비어있는 상태에서 온도, 압력 및 압축공기 질량이 낮게 유지되다가 제동에 의해 압축공기가 저장용기에 채워지면서 압력이 P_{min} 이상으로 상승하게 되면, 본격적으로 가·감속에 의한 압력, 온도, 및 압축공기 질량의 변화가 주행 종료 때까지 반복된다.

연비향상율[F·I·R]은 차량 가속시 사용되어진 총 구동에너지에 대한 감속시 저장된 압축공기의 재생 에너지의 비율로 정의되어 아래의 식으로 나타낸다.

$$F \cdot I \cdot R = \frac{\int W'_{regen} dt}{\int W'_{traction} dt} \times 100[\%]$$

상기와 같은 조건에서 시뮬레이션을 수행한 결과 제동에너지 회생율 및 연비개선 효과는 각각 75.7%, 25.6%로 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 스크롤 기기를 이용하는 공압식 회생제동 장치를 소개하고, 이 장치의 차량적용에 의한 연비개선 효과를 이론적으로 분석하였다.

자동차 배출가스 측정 시험방법인 CVS-75 모드 주행조건에서 중대형급 승용자동차를 대상으로 제동에너지 회생율과 연비 상승효과에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과 제동에너지 회생율 및 연비개선 효과는 각각 75.7%, 25.6%로 나타나 실용화 가치가 있음을 확인하였으며, 향후 적극적인 연구개발이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. Dong Soo Jung, Hyong Eui Kim, E Sok Kang, "Performance Evaluation for Hydraulic Type Energy Regenerative System", KSAE, Vol. 14, No. 2, pp. 136-144, 2006.
2. 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.
3. Sungwoon Jung, Jeongho Ryu, Youngsook Lyu, "Comparison of Correlation between CVS-75 Mode and Korea Mode to Estimate Emission Factors from Vehicles", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 22, No. 3, pp. 383-391, 2006.
4. Reynaldo Barros de Souza, Franco Giuseppe Dedini, "Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles" SAE 2009-36-0328.
5. Richard E. Sonntag, Introduction to Thermodynamics, 1982.