

## 전기자동차용 기계적 에너지 회생장치

신응수\*, 방재근<sup>+</sup>

(논문접수일 2011. 05. 02, 수정일 2011. 07. 22, 심사완료일 2011. 07. 25)

### Kinetic Energy Recovery System for Electric Vehicles

Eung-Soo Shin\*, Jae-Keun Bang<sup>+</sup>

#### Abstract

This paper presents a new regenerative brake system of electric vehicles that employs a continuous variable transmission(CVT) and a flywheel. The developed device has advantages over existing regenerative brakes from a standpoint of reliability and versatility in actual driving conditions. The system consists of a CVT, two wheels, a flywheel, a coupling and auxiliary powertrain components. The CVT is designed as a combination of two cones and a roller, which causes the velocity difference between the wheel and the flywheel. The power flow of the flywheel system is controlled by the CVT roller and the coupling through step motors. A prototype has been developed and then its performance has been investigated for various operating conditions. Results show that the storage efficiency of the flywheel is much affected by the vehicle's velocity and it is reduced below 20% for high speed, as compared to the 25% efficiency for an ideal condition. The CVT is a primary factor for lowering the flywheel efficiencies due to large friction and slipping between the cone and the roller.

**Key Words :** Kinetic Energy Recovery System(기계적 에너지 회생장치), Electric Vehicle(전기자동차), Flywheel(플라이휠), Continuous Variable Transmission(무단변속기), Regenerative Braking(회생제동)

### 1. 서론

기존의 내연기관 자동차가 가지고 있는 문제점을 해결할 수 있는 대안으로서 전기자동차에 대한 관심이 전 세계적으로 점점 커지고 있다. 전기자동차는 배기가스의 배출이 전혀 없어 친환경적이라는 특징뿐 아니라 기존 내연기관이 엔진에서의 열손실로 인해 매우 낮은 구동효율을 갖는데 비해 전기 모터는 손실 요인이 거의 없기 때문에 매우 높은 구동 효율을 기대할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 전기자동차의 경우 구동원인

배터리의 에너지 저장용량이 기존 내연기관 엔진에 비해 현저하게 떨어지기 때문에 에너지의 효율적인 활용 및 관리가 전기자동차의 실용화에 있어 필수적인 요인이라 할 수 있다. 따라서 그와 관련된 많은 연구가 진행되어 왔으며 그중에서도 자동차 주행의 가감속 특성상 제동 시 버려지는 에너지를 회수하여 다시 사용하는 회생제동에 관해 다양한 방식이 제안되었다<sup>(1-5)</sup>. 대표적으로 Toyota의 하이브리드 자동차에 적용되고 있는 방식을 들 수 있는데 전자제어에 의해서 제동에너지를 전기 에너지로 변환하여 배터리로 재충전하는 방식이다<sup>(6-7)</sup>. 하지만

\* 충북대학교 기계공학부 (esshin@cbnu.ac.kr)  
주소: 361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 12  
+ 서한산업

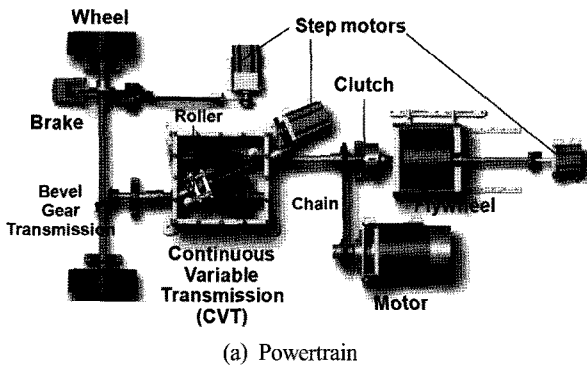
전자제어 방식은 배터리의 충전 상태, 차량의 속도, 기계식 유압 브레이크와의 호환 등 다양한 변수를 고려해야 하므로 매우 복잡할 뿐 아니라 회생제동이 가능한 경우가 매우 제한적이다<sup>(6)</sup>. 또한 전자제어의 특성 상 주변으로부터의 전자파 간섭에 의한 오작동 가능성도 있으며 심각한 안전 문제를 야기할 수 있다.

본 연구에서는 원추형 콘과 롤러가 결합된 형태의 무단변속기와 플라이휠을 조합한 기계적인 회생제동장치를 개발하고 그 성능을 분석하고자 한다. 이를 위하여 전기자동차를 단순화시킨 시제품을 설계 제작하고 에너지 저장 및 회생 성능을 차량 속도의 변화에 따라 분석한다.

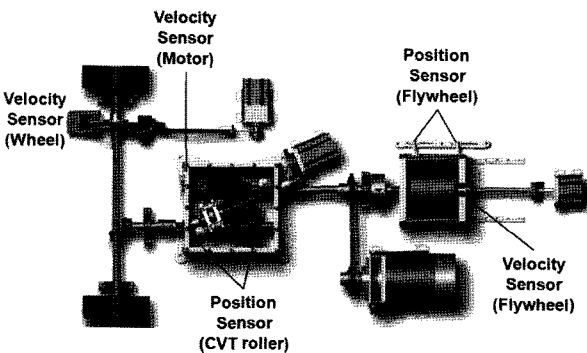
## 2. 플라이휠을 이용한 회생제동장치

### 2.1 장치 구성

Fig. 1(a)는 본 연구의 회생제동장치의 개략도로서 전기자동차의 구동원인 전기모터로부터 최종 출력을 생성하는 바퀴까지의 동력전달경로를 포함하고 있다. 모터로부터의 구동 토크는 체인을 거쳐 원뿔 형태의 무단변속기(Continuous variable transmission: CVT)로 전달된다. CVT는 두 개의 콘과 그 사이에 위치한 롤러로 구성되어 있는데 롤러는 스텝모터에 의해 위치를 제어하며 그 위치에 따라 CVT에서의 변속비가 결정된다.



(a) Powertrain



(b) Sensors for power control

Fig. 1 Schematic of a regenerative brake system

다. 이때 콘과 롤러 사이에서의 미끄럼을 최소화시키기 위하여 롤러와 콘 사이의 수직력은 스프링으로 조절한다. CVT는 모터 구동시에는 모터의 일정한 회전속도를 바퀴에서의 가변 속도로 변환해주는 역할을 하고 제동 시에는 바퀴와 플라이휠 사이의 속도 차이를 증대하여 바퀴가 갖는 에너지를 가능한 많이 플라이휠로 저장될 수 있도록 하는 역할을 한다. 플라이휠은 주동력축과 클러치를 통해서 연결되어 있는데, 모터 구동 시에는 클러치가 분리되어 플라이휠은 정지해 있으며 제동을 할 경우에는 모터가 정지하고 클러치는 주동력축에 접속되어 바퀴의 에너지가 플라이휠로 전달된다. 플라이휠로의 에너지 저장은 플라이휠의 속도가 바퀴의 속도와 같아지는 순간까지 진행되는데 이때 CVT는 바퀴와 플라이휠 사이의 변속비를 조절하여 가능한 많은 에너지가 플라이휠에 저장되도록 하는 역할을 한다. Fig. 1(b)는 동력전달 경로를 제어하기 위한 센서들을 나타낸 것으로 바퀴와 플라이휠, 모터 각각의 회전속도를 측정하기 위한 센서와 CVT 롤러 위치를 측정하기 위한 센서, 플라이휠 클러치의 개폐를 조절하기 위한 위치 센서이다.

### 2.2 CVT에 의한 회생제동 특성

Fig. 2(a)는 제동 시 CVT를 경유하여 바퀴에서 플라이휠로의 동력전달을 나타낸다. 롤러로부터 콘에 접선력  $F_R$ 이  $\Delta t$  동안 작용할 경우 아래의 관계가 성립한다.

$$-F_R r_W \Delta t = I_W \omega_{W_f} - I_W \omega_W \quad (1)$$

$$F_R r_F \Delta t = I_F \omega_{F_i} \quad (2)$$

여기서  $I$ 는 질량관성모멘트이고 아래첨자의  $W$ 는 바퀴를,  $F$ 는 플라이휠을 의미하고  $i$  및  $f$ 는 바퀴로부터 플라이휠로의 에너지 저장 구간의 시작과 끝을 각각 의미한다. 이 때 CVT 콘과 롤러 사이에 미끄럼이 발생하지 않는다면 아래의 속도 관계식이 성립한다.

$$\omega_{W_f} r_W = \omega_{F_i} r_F \quad (3)$$

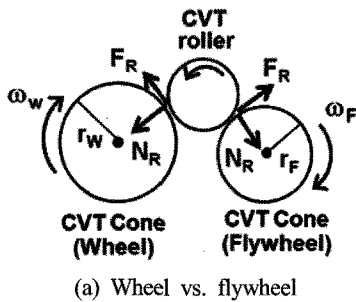
식 (1), (2) 및 (3)으로부터 제동 전후 플라이휠의 에너지 저장 효율  $\eta_S$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$\eta_S = \frac{\frac{1}{2} I_F \omega_{F_i}^2}{\frac{1}{2} I_W \omega_W^2} = \frac{n^2 \gamma}{(n^2 \gamma + 1)^2} \quad (4)$$

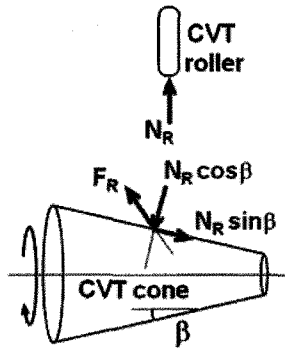
여기서,  $n$ 과  $\gamma$ 는 바퀴와 플라이휠 사이의 속도비 및 질량관성모멘트의 비로서 다음과 같이 정의한다.

$$n \equiv \frac{\omega_{F_f}}{\omega_{W_f}}; \gamma \equiv \frac{I_F}{I_W} \quad (5)$$

한편 플라이휠로부터 바퀴로의 에너지 회생 효율  $\eta_R$ 도 위와 동일한 과정으로 구할 수 있으며 그 결과는 식 (4)의  $\eta_S$ 와 동일하게 주어진다. Fig. 3은 이를  $n$ 과  $\gamma$ 의 변화에 대해 나타낸 것으로  $n$ 값에 관계없이 플라이휠 효율의 최대값은 0.25로 주어지며  $n$ 값에 따라 최대가 되는  $\gamma_{max}$ 가 결정되는데  $n$ 이 커질수록  $\gamma_{max}$ 가 작아진다. 설계 관점에서는 플라이휠의 질량관성모멘트가 작을수록 질량 및 크기가 줄어들므로 바람직하다고 할 수 있으나  $n$ 을 크게 할 경우 CVT 콘의 경사각이 커져서



(a) Wheel vs. flywheel



(b) Cone vs. roller

Fig. 2 Freebody diagram for the CVT power transmission

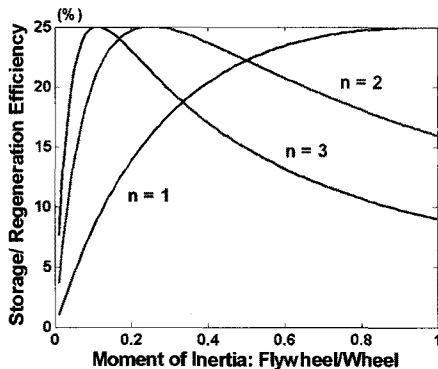


Fig. 3 Flywheel efficiency

롤러와의 사이에 미끄럼이 발생할 가능성이 높아진다.

Fig. 2(b)는 CVT에서 동력 전달 시 콘과 롤러 사이에 작용하는 힘을 나타낸 것으로 롤러로부터 콘에 작용하는 수직력  $N_R$ 는 롤러 내부의 스프링 장력에 의해 조절되는데 콘의 경사각  $\beta$ 로 인하여 콘 표면에 작용하는 법선력  $F_n$ 과 접선력  $F_t$ 는 다음과 같다.

$$F_n = N_R \cos \beta; F_t = \sqrt{(N_R \sin \beta)^2 + F_R^2} \quad (6)$$

여기서  $F_R$ 는 동력전달 토크에 의해 결정되며 이 때 미끄럼이 발생하지 않기 위한 조건은 식 (7)과 같다.

$$N_R > \frac{(I_W \alpha_W / r_W)}{\sqrt{\mu_s^2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta}} \quad (7)$$

위 식에서  $\mu_s$ 는 콘과 롤러 표면에서의 정지마찰계수이고  $\alpha$ 는 각가속도이다.

Table 1은 본 연구의 회생제동장치의 주요 설계 변수를 정리한 것으로서  $n=2.69$ 로 정하였고 이 때 플라이휠 효율이 최대가 되는  $\gamma=0.14$ 에 따라 플라이휠의 질량관성모멘트를 결정하였다.

Fig 4는 설계 제작한 시제품의 사진으로서 상부는 동력전달계 각 요소로 구성되어 있으며 하부는 전원공급 및 제어를 위한 장치로 구성되어 있다. 제어기는 동력원인 구동모터, 플라이휠 클러치 및 CVT 변속롤러의 위치 조절용 스텝모터를 제어한다.

### 3. 성능 분석

#### 3.1 실험 개요

본 연구에서의 회생제동장치의 성능을 분석하기 위하여 Fig. 5에 보이는 바와 같이 모터로부터 바퀴까지 에너지를 전달하는 과정과 모터 정지 상태에서 바퀴의 에너지가 플라이휠

Table 1 System parameters

Properties		Value	
Mass moment of inertia (kg-m <sup>2</sup> )	Wheel	0.300	
	Wheel axle	0.0000156	
	Flywheel	0.042	
	CVT	0.0003	
CVT geometry	Clutch	0.000835	
	Slope (°)		17.67
	Radius (mm)	Short	15.55
Long		41.92	

로 전달되는 과정을 반복하면서 모터, 바퀴 및 플라이휠의 회전속도  $\omega_M, \omega_W, \omega_F$ 를 측정하고 이로부터 플라이휠의 에너지 저장 및 회생 효율을 구했다.

모터 구동 시 모터의 회전 속도는 일정한 반면 CVT 롤러가 Fig. 5의 "S"로부터 "F"로 이동하며 변속함으로써 바퀴 속도는 증가하며 모터가 정지한 상태에서 바퀴로부터 플라이휠로 에너지가 저장될 때는 CVT 롤러가 "F"에서 "S"로 이동하며 변속함으로써 에너지 저장 주기를 조절하였다.

Fig. 6은 성능실험 결과로 구한  $\omega_M, \omega_W, \omega_F$ 의 시간이력곡선을 예시한 것으로서 바퀴가 정지 상태에서부터 "1"에 도달할 때까지의 구간은 모터에 의한 에너지 공급 단계이고 "1"부터 "2"까지의 구간이 플라이휠로의 에너지 저장 단계이며 다시 모터가 구동하기 시작하는 "3"에서 "4"까지의 구간은 플라이휠이 갖고 있는 에너지를 동력전달계로 회생되는 단계이다.

Fig. 6의 측정 결과로부터 제동 전후 플라이휠의 에너지 저장효율  $\eta_S^*$  은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta_S^* = \frac{I_F \omega_{F_2}^2}{I_W \omega_{W_1}^2} \quad (8)$$

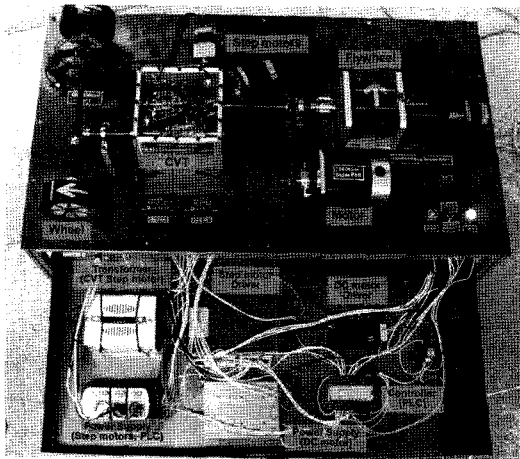


Fig. 4 Prototype of the powertrain with a regenerative brake system

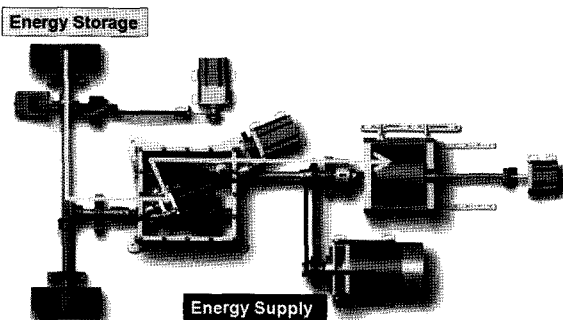


Fig. 5 Power flow

한편 플라이휠의 에너지 회생 효율  $\eta_R^*$ 은 Fig. 6으로부터 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_R^* = \frac{I_W \omega_{W_4}^2}{I_F \omega_{F_3}^2} \quad (9)$$

본 연구에서는 제동 전 차량의 속도에 해당하는 Fig. 6의 "1"에서 바퀴 속도  $\omega_{W_1}$ 의 변화에 따라 에너지 효율  $\eta_S$  및  $\eta_R$ 을 구하여 성능을 비교하였으며 에너지 저장과 회생을 Fig. 7에 도시한 바와 같이 4주기에 걸쳐 반복하고 각 주기마다 효율을 구하여 이를 평균하였다.

### 3.2 결과 분석

Fig. 8은 플라이휠의 에너지 효율을 저장 단계와 회생 단계에 대해 도시한 것으로 플라이휠로 에너지가 전달되기 직전의 바퀴의 속도의 함수로 나타냈다. 설계 단계에서의 효율이 25%인 반면 실제 측정한 에너지 효율은 저장 단계의 경우 1000rpm 이하의 저속에서는 20%를 약간 상회하지만 속도가 증가함에 따라 많이 감소하는 경향을 보인 반면 회생 효율의 경우 1100rpm에서 최대 23%를 보이지만 저장 효율처럼 속도

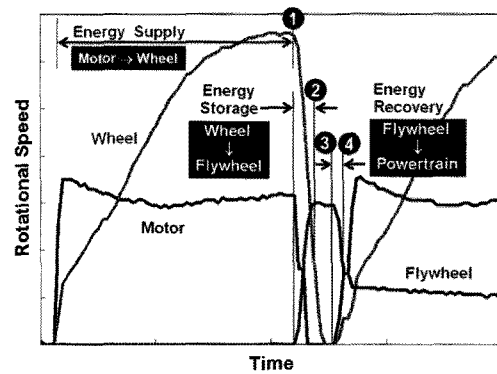


Fig. 6 Typical results of performance evaluation

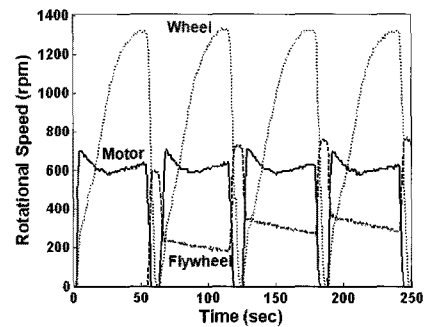


Fig. 7 Four cycles of energy storage/regeneration for performance evaluation

의 영향을 크게 받지 않는 것을 알 수 있다.

이렇게 효율을 저하시키는 원인들을 살펴보면 우선적으로 동력전달계 각 요소의 회전 마찰에 의한 손실을 들 수 있는데 동력전달계를 구성하는 각 요소별로 분리하여 회전시키면서 감속 정도를 측정하면 해당 요소에서의 마찰 손실을 구할 수 있다. Fig. 9는 CVT에서 마찰에 의한 감속선도이다.

Table 2는 그 결과를 정리한 것인데 CVT의 경우 마찰 토크는 롤러가 Fig. 9의 위치에 놓인 상태에서 바퀴의 회전속도의 변화를 측정하여 얻은 결과이다. Fig. 10은 CVT에서의 마찰에 의해 저장 단계에서 발생하는 에너지 손실을 도시한 것으로 에너지 손실은 속도가 증가함에 따라 큰 폭으로 커지는 것을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 8과 비교해볼 때 저장 효율 곡선과 거의 반대 경향을 보이는데 이는 CVT에서의 마찰 손실이 저장 효율을 저하시키는 가장 큰 역할을 하는 것을 의미한다. 회생 단계의 경우 바퀴 및 플라이휠의 실제 속도는 높지 않으며 다만 Fig. 8에서의 속도는 회생 제동 직전의 바퀴 속도를 의미하므로 회생 효율이 속도의 영향을 별로 받지 않으며 고속인 경우 제동 전 바퀴가 갖는 운동에너지가 플라이휠로 전달되는 양이 많기 때문에 저속인 경우보다도 효율이 약간 높은 것을 관찰할 수 있다.

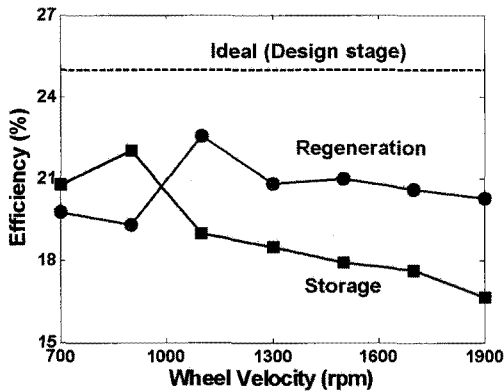


Fig. 8 Flywheel efficiency

플라이휠의 에너지 효율을 저하시키는 또 다른 요인으로 CVT에서의 미끄러짐에 의한 전달 손실을 들 수 있다. 미끄러짐 방지를 위하여 CVT의 콘과 롤러에는 스프링 장력이 가해지고 있지만 결과적으로 Fig. 11에 나타난 바와 같이 미끄러짐이 발생하며 스프링 장력이 충분하지 않다는 것을 확인할 수 있는데 이러한 현상이 발생한 원인으로 식 (7)에서 고려하지 않은 사항으로는 롤러 변속시 직선 이동에 따르는 동적 효과, CVT 콘과 롤러 사이의 윤활에 따른 마찰계수의 감소 등을 들 수 있다.

Table 2 Friction at the powertrain

Component		Friction torque (N-m)
CVT	1	0.2513
	2	0.1461
	3	0.1396
	4	0.1337
	5	0.0982
Wheel		0.1554
Flywheel		0.0087

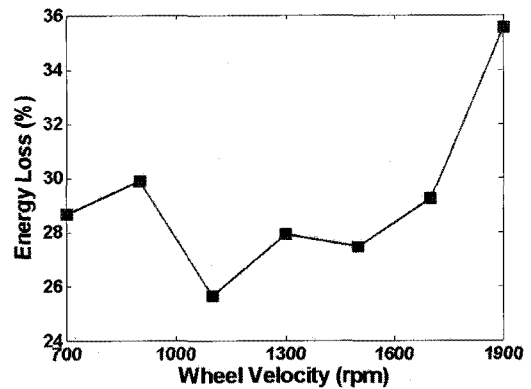


Fig. 10 Energy loss at the CVT

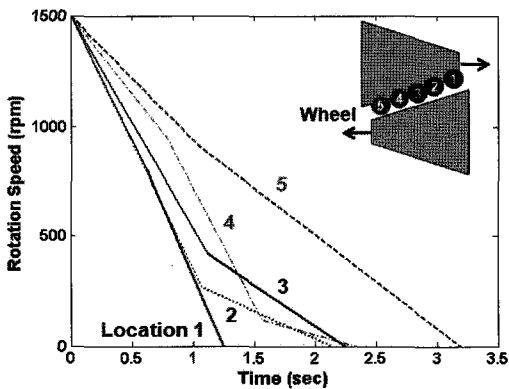


Fig. 9 Speed reduction at CVT by friction

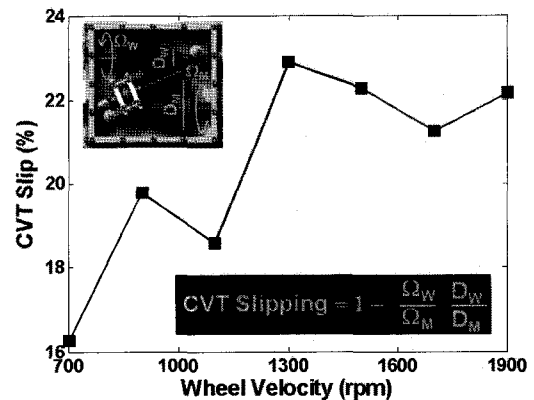


Fig. 11 Slipping at the CVT

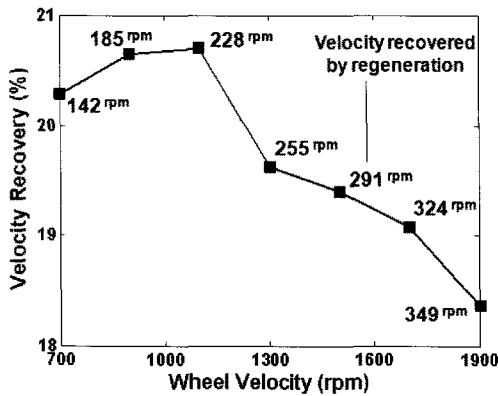


Fig. 12 Velocity recovery by regenerated braking

한편 Fig. 12는 플라이휠에 의한 회생 제동에 의해 차량이 정지 상태에서 도달할 수 있는 속도를 제동 전 속도와의 비율로 나타낸 것으로 제동 전 속도가 1100rpm 이하의 저속 구간에서는 20%를 상회하는 반면 그 1300rpm 이상에서는 그 이하로 떨어진다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 전기자동차의 제동 시 버려지는 에너지를 회수하기 위한 회생제동장치로서 무단변속기와 플라이휠을 이용한 기계적인 시스템을 설계 제작하고 그에 대한 성능을 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 차량 제동 시 바퀴로부터 플라이휠로의 에너지 저장 효율은 제동 직전의 차량 속도의 영향을 많이 받으며 속도가 증가할수록 저장 효율이 떨어진다. 반면 플라이휠로부터 차량으로의 에너지 회생 효율은 속도의 영향을 별로 받지 않는다.
- (2) CVT는 본 연구의 회생제동장치의 성능에 가장 큰 영향을 미치는데 차량 바퀴와 플라이휠의 속도 차이를 발생시켜 동력전달 경로 및 시간을 조절하고 회생제동 효율을 결정한다. 회생제동장치의 저장 및 회생 효율의 설계치는 각각 25%이지만 CVT에서의 마찰에 의한 에너지 손실과 CVT 콘과 롤러 사이의 미끄럼 발생에 의한 손실로 인하여 측정된 효율은 1000rpm 이하의 저속에서는 저장 및 회생 효율이 대략 20%에 머물며 고속으로 갈수록 저장 효율이 그

이하로 저하된다.

- (3) 향후 효율을 개선하기 위해서는 CVT의 면밀한 특성 분석이 우선되어야 하며 CVT 콘과 롤러 사이의 동적 효과를 고려한 마찰 특성 분석과 그에 기초하여 미끄럼 방지를 위한 롤러 설계와 회생제동장치의 사용 조건을 도출하는 것이 필요하다.

#### 후 기

이 논문은 2010년도 충북대학교 학술연구 지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- (1) Hall, P., and Bain, E., 2008, "Energy-storage Technologies and Electricity Generation," *Energy Policy*, Vol. 36, No. 12, pp. 4352-4355.
- (2) Kim, B. W., 2007, "Technical Characteristics of Energy Storage Systems for Hybrid Electric Vehicles," *J. of Power Electronics*, Vol. 12, No. 5, pp. 31-36.
- (3) Yeo, H., Kim, S., and Kim, K., 2006, "Regenerative Brake System for Hybrid Electric Vehicles," *Auto Journal*, Vol. 6, No. 6, pp. 38-45.
- (4) Zheng, C., Park, Y., Lim, W., and Cha, S., 2009, "Research on Driving Control Strategies of HEV," *2009 Spring Conference, KSAE*, pp. 38-45.
- (5) Choi, S., and Kim, Y., 2005, "Compound CVT Realizing Power Circulation Mode and Power Split Mode," *KSMTE*, Vol. 14, No. 4, pp. 96-103.
- (6) Nakamura, E., Soga, M., Sakai, A., Otomo, A., and Kobayashi, T., 2002, "Development of Electronically Controlled Brake System for Hybrid Vehicle," *SAE 2002-01-0300*.
- (7) Bolund, B., Bernhoff, H., and Leijon, M., 2007, "Flywheel Energy and Power Storage Systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, pp. 235-258.
- (8) Beiker, S., and Vachennauer, R., 2009, "Regenerative vs. Friction Braking of Hybrid Electric Vehicles," *SAE 2009-01-0442*.