

회생제동을 이용한 전기바이크의 운전효율에 관한 연구

최두진, 정태용, 신동훈[†], 남진현[†]
[†]국민대학교

A study on the operation efficiency of an electrical bike which use regeneration-braking system

Doo Jin Choi, Tae Yong Jung, Dong Hoon Shin[†], Jin Hyun Nam[†]
[†]Kookmin University

1. 서론

화석연료의 고갈과 환경오염의 심화로 인해 화석연료를 대체하거나 줄일 수 있는 신재생 에너지의 연구가 활발히 진행 중이다. 자동차의 경우, 하이브리드나 연료전지 자동차의 연구가 활발히 진행 중이며 하이브리드 자동차는 내연기관과 전기모터를 혼용하여 효율적으로 구동시킴으로써 연비를 향상시킨 차량이다.⁽¹⁾ 자동차의 경우 제동 시에 많은 운동에너지가 열에너지로 바뀌어 대기 중에 버려지지만 하이브리드 자동차의 경우 제동 시에 버려지는 운동 에너지를 전기에너지로 회생시켜 에너지를 절감한다. 이 회생에너지는 에너지효율의 40%를 차지할 정도로 크다고 한다.⁽²⁾ 전기바이크의 경우도 제동을 하게 되면 마찰에 의해 열에너지가 발생하고 이는 대기 중에 방출된다. 본 연구는 전기바이크에도 하이브리드 자동차에서와 같이 회생제동 시스템을 적용하였을 경우 이에 따른 주행거리 연장 및 에너지절약에 대한 성능을 알아보았으며, 실험적 방법을 통하여 수행되었다.

2. 실험방법

2-1. 회생제동 시스템의 원리

회생제동은 제동방법 중 하나로 차량의 감속 또는 제동 시에 운동에너지를 전기에너지로 회생시켜 이용한다.

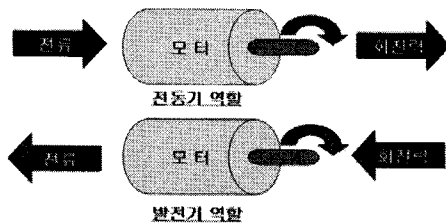


Fig. 1 회생제동의 원리

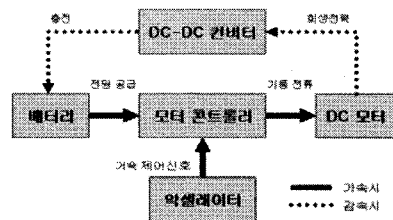


Fig. 2 시스템 계통도

Fig. 1과 같은 DC모터의 회전자에 회전력을 가해주게 되면 플레밍의 오른손 법칙에 따라 전기모터는 발전기로서 동작하며, 출력전류에 비례하여 전기모터의 회전자는 구속을 받게 된다.

2-1-1. DC-DC 컨버터

DC-DC 컨버터는 Fig. 3과 같이 모터(발전기)에서 발전된 불안정한 전압을 안정된 전압으로 변환한다. 가변저항의 조정으로 DC-DC 컨버터의 출력전류를 가변시켜 회생제동력을 제어한다.

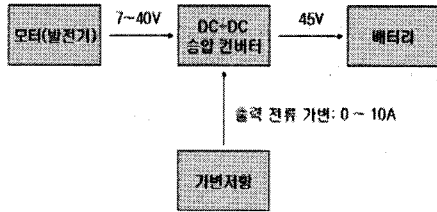


Fig. 3 회생제동장치의 계통도

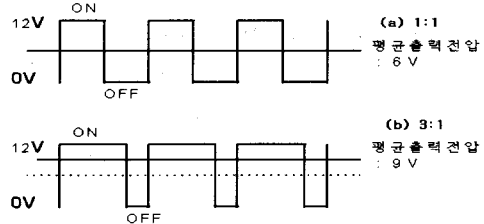


Fig. 4 PWM 제어의 원리

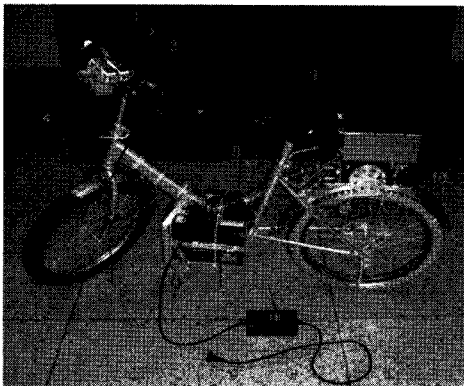
그러나 본 실험에서는 고정저항을 사용하여 고정된 제동력을 얻도록 하였다. DC-DC 컨버터의 설계에는 PWM Controller로 사용되는 TL494 IC⁽³⁾를 사용하였고 DC-DC 컨버터의 여러 가지 방식 중에 비절연형 BOOST 컨버터⁽⁵⁾로 설계하였다.

2-1-2. 모터 컨트롤러

모터 컨트롤러의 설계는 DC모터의 속력을 제어하는 방법 중 하나인 PWM 제어를 하도록 하였다. Fig. 4는 PWM으로 구동하는 DC모터의 양단에 걸리는 전압 파형을 나타내고 있다. Fig. 4의 (a)와 같이 ON, OFF의 비율을 1:1로 만들어 주면 전압의 1/2에 해당하는 6V의 평균 출력전압이 DC모터의 양단에 걸리는 원리로 DC모터가 제어된다. 설계에는 PWM Controller로 사용되는 TL494 IC⁽³⁾를 사용하였다.

2-1-3. 차체 및 동력전달부분

전기모터의 동력전달은 체인 구동방식이며 1:7.3의 감속비를 얻었다. 또한 체인의 풀림방지를 위해 장력유지 장치를 설치하였다. 배터리는 18Kg의 무게를 차지하므로 차체의 안정성과 무게중심을 고려하여 중앙하단에 장착하였고 차체는 일반 소형자전거를 사용하였다. 측정에 필요한 전압, 전류, 속력을 나타내는 측정기기는 핸들에 설치하였다.



1. 악셀레이터: 가속 및 회생제동에 이용
2. 속도계: 바이크속력에 관련된 정보를 표시
3. 전압계, 전류계: 전압, 전류를 표시
4. 라이트: 야간 주행용 10W Power LED
5. 회전수 센서: 회전수 감지
6. 배터리: 12V 18Ah 납축전지 3개 직렬연결
7. 충전기: 배터리 충전용
8. 메인 스위치: 자체 전원을 켜고 끄
9. 회로 박스: 전자회로가 내부에 있음
10. DC모터: 1KW 영구자석 DC모터

Fig. 5 제작한 회생제동 전기바이크

2-2. 경사로 강하 시 회생에너지 실험

제동 시에 운동에너지로부터 전기에너지로 변환되는 회생에너지와 변환효율을 측정하기 위해 Fig. 6과 같은 조건의 경사로 구간에서 v_1 을 3.3m/s, 6.6m/s의 두 가지 조건의 속력으로 진입하여 강하할 때 발생한 전류와 시간 그리고 나중속력(v_2)를 측정하였다.

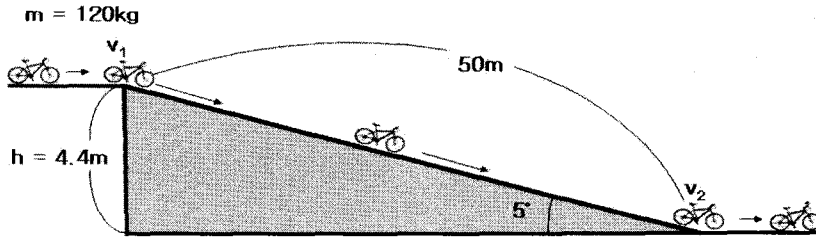


Fig. 6 경사로 강하 시 회생에너지 실험 개요도

이론식⁽⁴⁾은 다음과 같다, 이 실험에서 $\Delta E_{\text{마찰}}$ 은 무시한다.

$$\Delta E_{\text{위치}} + \Delta E_{\text{운동}} + \Delta E_{\text{마찰}} + E_{\text{회생제동}} + E_{\text{회생제동열손실}} = 0 \quad (1)$$

$$\text{회생제동 효율} = \frac{E_{\text{회생제동}}}{E_{\text{회생제동}} + E_{\text{회생제동열손실}}} \times 100(\%) \quad (2)$$

$$= \frac{E_{\text{회생제동}}}{-\Delta E_{\text{위치}} - \Delta E_{\text{운동}} - \Delta E_{\text{마찰}}} \quad (3)$$

$$= \frac{VI \cdot t}{mgh + \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_2^2)} \quad (4)$$

2-3. 평지주행 실험 및 경사로 주행 실험

주행 실험은 회생제동만을 하였을 경우와 마찰제동만을 하였을 경우 최대 주행거리의 차이를 비교하는 실험으로 일정한 거리의 평지와 경사로에서 선회 가능한 횟수를 측정하였다.

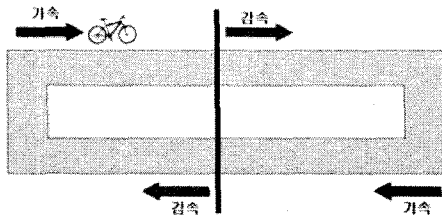


Fig. 7 평지주행 실험 개요도

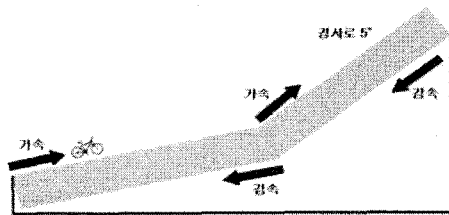


Fig. 8 경사로주행 실험 개요도

Fig. 7과 같이 선회할 수 있는 왕복 약 200m 거리의 평지에서 가속과 감속구간을 설정하였으며, 경사로 주행 실험에서는 Fig. 8과 같이 선회할 수 있는 왕복 약 300m 거리의 경사로에서 가속과 감속구간을 설정하여 주행 실험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. DC-DC 컨버터의 성능

Table. 1 DC-DC 컨버터의 제원

입력 전압	DC 7~ 40V
출력 전압	DC 45V
출력 전류	0~ 10A
최대출력	500W
스위칭 주파수	60KHz
전력변환효율	85%

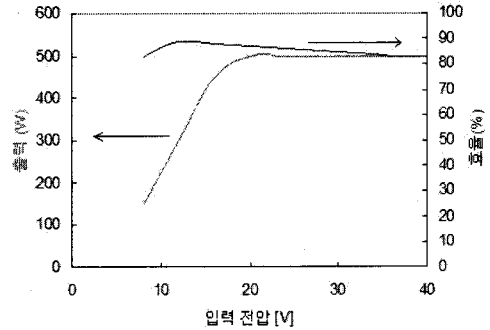


Fig. 9 DC-DC 컨버터의 출력 및 효율

DC-DC 컨버터는 Fig. 9의 그래프에 나타난 바와 같이 입력전압 7V를 기점으로 동작하며 입력전압 18V부근에서는 500W의 최대출력에 도달한다. 변환효율은 입력전압 12V까지 증가하다가 입력전압이 증가할수록 다소 감소한다.

3-2. 모터 컨트롤러의 성능

Table. 2 모터 컨트롤러의 제원

입력 전압	DC 30~ 45V
출력 전류	최대 80A
제어 방식	PWM
제어 범위	0~ 100%
동작 주파수	3KHz
효율	96%

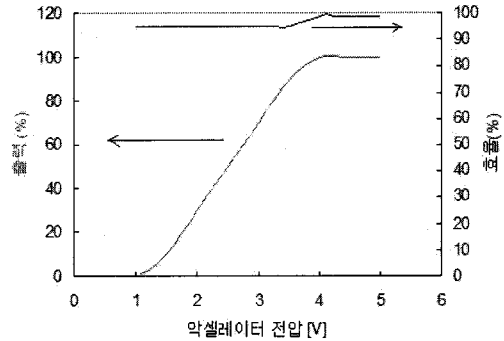


Fig. 10 모터 컨트롤러 제어특성 및 효율

모터 컨트롤러는 Fig. 10과 같이 악셀레이터의 전압신호가 1V이상에서 동작을 시작하고 4V이상일 때 최대출력을 낸다. 모터 컨트롤러의 효율은 3.5V 부근까지 95%정도를 보이고 4V부근에서는 100%에 가까워지는 특성을 보였다.

3-3. 경사로 강하 시 회생에너지 실험결과

Table. 3 실험1 ($v_1 = 3.3\text{m/s}$)

횟수	I(A)	t(s)	v2(m/s)	회생에너지(J)	효율(%)
1	3.7	12.1	4.5	2014.7	43.6
2	3.9	11.4	4.2	2000.7	41.9
3	3.8	11.8	4.4	2017.8	43.1
평균	3.8	11.8	4.4	2011.1	42.8

Table. 4 실험2 ($v_1 = 6.6\text{m/s}$)

횟수	I(A)	t(s)	v2(m/s)	회생에너지(J)	효율(%)
1	6.0	7.9	6.1	2133.0	38.3
2	5.8	8.4	5.8	2192.4	38.0
3	5.9	9.3	6.0	2469.2	43.8
평균	5.9	8.5	6.0	2264.9	40.0

경사로 강하 시 회생에너지 실험에 의한 운동에너지에서 전기에너지로의 변환효율은 Table 3, Table 4와 같이 약40%정도였다. 두 가지 실험에서 실험2보다 실험1의 평균효율이 더 높게 나타났는데 이는 3.3m/s속력에서 모터(발전기)의 발전전압은 측정결과 약 12V정도였으며 Fig. 9 그래프를 참고할 때 DC-DC 컨버터의 효율이 12V부근에서 가장 높은 전력변환효율을 나타내기 때문이라고 해석할 수 있다. 또한 실험2보다 실험1의 속력이 상대적으로 느렸기 때문에 공기저항과 마찰에 의한 영향이 실험2에 비해 작다고 추측할 수 있다. 회생에너지 변환효율을 제외한 나머지 60%정도의 손실은 모터(발전기), 동력전달 부분, DC-DC컨버터 등에 의한 마찰 또는 열 손실이다.

3-4. 주행실험 결과

Table. 5 평지 주행 실험결과

제동방식	선회횟수	시간	주행거리
마찰제동	16	19분 30초	-
회생제동	20	23분 12초	25% 증가

Table. 6 경사로 주행 실험결과

제동방식	선회횟수	시간	주행거리
마찰제동	7.5	14분 59초	-
회생제동	8.5	16분 12초	13% 증가

주행실험의 경우 Table. 5, Table. 6 과 같이 회생제동만을 하였을 경우가 마찰제동만을 하였을 경우 보다 주행거리가 증가함을 알 수 있다. Table. 6의 선회횟수 소수점자리의 표기는 경사로 주행 실험 중 경사로 주행 중에 배터리가 소진되었음을 의미한다. 두 실험을 비교할 때 평지가 경사조에 비해 주행거리의 연장비율이 높는데, 이는 전기바이크 제작 시에 평지에 알맞은 감속비로 설정하였기 때문이다. 또한 경사로 가속 시에는 컨트롤러와 DC 모터에서의 열 손실이 평지에 비해 크기 때문이라고 사료된다.

4. 결론 및 향후계획

실험을 통한 회생제동은 평균적으로 40%이상의 변환효율을 나타냈고 13~ 25%의 주행거리를 연장시킬 수 있었다. 회생제동은 기계적방식이 아니므로 소모품이 사용되지 않으며 마찰제동과 연동하여 사용이 가능하다. 결과적으로 회생제동은 주행거리를 연장시키고 에너지를 절약하며 마찰제동에서와 같은 마찰 소모품을 필요로 하지 않는다. 본 연구에서는 악셀레이터를 놓았을 때 고정적인 회생제동이 되도록 하였지만, 향후계획으로 가변식 회생제동, 리튬폴리머 전지, 자동변속기를 사용하여 효율적인 구동이 되도록 고안할 예정이다.

5. 참고문헌

- [1] 김현수; 여훈; 오경철; 김동현. 하이브리드 전기자동차의 현황과 전망, 대한기계학회, 2005, 5
- [2] 김길동; 이한민. 전동차 회생에너지 활용을 위한 저장시스템 기술, 한국조명·전기설비학회, 2006, 4
- [3] Texas Instruments. TL494 PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS, Texas Instruments Incorporated, 1999, 7
- [4] Hecht; Eugene. PHYSICS Calculus, 2007, 2
- [5] 김희준. 비절연형 DC-DC 컨버터, SMPS 기본설계, 2000, 4