

대중교통에서의 에너지 절감

By Ricardo Barrero, Joeri Van Mierlo, and Xavier Tackoen

본 글은 IEEE Vehicular Technology Magazine 2008년 vol. 3에 게재된 Ricardo Barrero 외 2인 저자의 “Energy Savings in Public Transport”를 번역하여 재편집한 내용입니다.

김 상 현

(숭실대 전기공학부 석사과정)

1. 서론

주요 도시에서 증가하고 있는 오염 수준과 교통 정체는 좀 더 효율적인 대중교통 시스템에 의해 완화될 수 있는 민감한 문제가 되고 있다. 공해 배출물을 감소시키기 위해 많은 도시에서 전기 구동 차량이 사용되고 있다. 유동인구의 수와 기간 시설에 따라 여러 종류의 전기 구동 차량(전기 배터리 버스, 트롤리 버스, 전차, 지하철, 경전철)이 이용될 수 있다. 이러한 교통수단들이 유해가스 배출에 있어서 많은 양의 감축을 가능하게 했지만 에너지 효율은 여전히 크게 향상 시킬 여지가 있다. 이러한 에너지 효율 향상은 에너지회수를 목적으로 하는 에너지 저장 시스템(ESS: Energy Storage System)을 구동시스템에 하이브리드 화 하였기에 가능하다^{(1),(2)}. 최근 연구 결과를 보면 전기 철도 차량에 공급되는 40%이상의 에너지를 회생제동으로 인한 재생에너지로 충당할 수 있다고 설

명되고 있다⁽³⁾. 이런 재생에너지는 발생과 동시에 다른 차량에서 소모될 수 있다는 가정 하에 급전망을 통해 다른 차량으로 보내질 수 있으나, 교통정체가 거의 없는 전차 네트워크에서는 제동 에너지의 재사용 비율이 낮기 때문에 이러한 경우는 드물다. 낮은 비율의 회생제동으로 인해 재생에너지가 매우 적게 발생한다.

슈퍼커패시터가 사용되는 에너지 저장 시스템은 높은 피크 전력이 빈번히 발생하는 분야에 적용하기에 적절하다⁽⁴⁾. 또한 슈퍼커패시터는 낮은 내부 저항으로 인해 충/방전 사이클 효율이 높으며 동시에 정전기적 특성상 긴 수명이 허용된다⁽⁵⁾.

전차의 구동장치와 슈퍼커패시터의 하이브리드 화를 통해 에너지 절감, 피크 전력 절감, 공급전력선의 전압안정 등과 같은 다양한 목적을 이룰 수 있다^{(6),(7)}. 하지만 이러한 목적을 이루기 위해서는 특정한 제어 기법과 특정한 규모의 에너지 저장 장치가 필요하게 된다⁽⁸⁾. 이 글에서는 에너지 절감을 목

적으로 한 에너지 저장 시스템의 개발에 대해 서술하고 30m의 전차에 적절한 0.91~1.56kWh 용량의 서로 다른 에너지 저장 시스템들을 제안하고자 한다. 에너지 용량, 전압변동, 최대전류, 전력 손실, 전차의 모델, 급전망, 전력흐름 등을 고려한 시스템을 구성하기 위하여 Matlab/Simulink를 기반으로 하여 프로그램이 개발되었다. 같은 드라이빙 조건과 보조 부하 상황 하에서 변전소에서 얻어진 절감된 에너지의 양은 24~27.6%였으나, 슈퍼커패시터의 수명이 다했을 때(EoL: End-of-Life)는 슈퍼커패시터의 모듈과 차량 부하에 따라 그 범위가 18.1~25.1%로 바뀌었다.

2. 사례 연구

브뤼셀 23번 도로에서 현재 운행 되고 있는 Bombardier Flexity사의 T3000 전차를 대상으로 한 사례 연구가 진행되었다.

시뮬레이션 프로그램은 Matlab/Simulink을 기반으로 하여 개발되었다. 이는 전차, 급전망, 변전소의 특성을 고려한다. 이 프로그램의 목적은 슈퍼커패시터가 적용된 전차의 동작을 시뮬레이션하고, 에너지 소비, 선간 전압 그리고 변전소로부터 공급된 전력에서의 효과를 보여 주는데 있다. 이는 슈퍼커패시터가 사용되지 않은 일반적인 전차와 비교될 것이다. 이것의 목적은 가공선에 연결된 실제 변전소 및 급전선의 분포에 근거하여 실제와 거의 흡사한 전력망을 구현하는 것이다.

여기서, 시스템의 간략화를 위해, 급전망 모델은 1.5km에 걸쳐서 균일하게 분포되어 있는 변전소에 대한 표준을 근거로 하여 시뮬레이션 된다. 시뮬레이션 프로그램으로 인하여 슈퍼커패시터가 적용된 에너지 저장 시스템의 에너지, 전력, 최대 전류 그리고 전압변동에 대한 크기가 정해진다.

3. 매개 변수

■ 전차

- 무게 (무부하/부하) : 38.6/56.1 t
- 최고 속도 : 70km/h
- 공칭 전력 : 4 × 105kW
- 구름 저항 계수 : 0.006
- 공기역학적 항력 계수 : 0.6
- 기어박스 효율 : 93%
- 모터 효율 : 90%
- 모터 드라이브 효율 : 91%
- DC/DC 전력변환기(슈퍼커패시터) 효율 : 91%

■ 급전망

- 전선 가공선 저항(100mm² 구리) : 170m Ω/km
- 레일 전기 저항 : 17.2m Ω/km
- 변전소 내부 저항 : 30m Ω
- 변전소 간 거리 : 1,500m
- 무부하 변전소 전압 : 700V

4. 시뮬레이션 도구

Matlab/Simulink로 디자인된 전차와 급전망 모델은 후진법(backwards method)을 기반으로 하고 있다^{[9],[10]}. 시뮬레이션 프로그램은 드라이빙 사이클로부터 시작하여 요구되는 전력량을 결정하고 그 값으로 부터전차와 모든 변전소에서의 전류 및 전압 값을 계산한다. 일반적인 전차가 운전될 때 변전소로 부터 공급된 에너지의 양을 하이브리드 전차에서 사용된 양과 비교하면, 에너지 저장량이 결정된다. 뒤에 보이겠지만 슈퍼커패시터가 사용됨에 의해 회생제동으로 부터의 직접적인 약간의 에너지 절감 뿐 아니라 급전선에 대한 견인전류가 작아짐에 의해 절감되는 에너지도 있다. 그림 1은 두 전차가 운행되는 각각의 사례의 프로그램을 보여준다. 시뮬레이션 프로그램은 다수의 운행되고 있는 전차를 제어할 수 있다. 그들 각각은 독특한 특징, 무게 및 운전 사이클을 가졌다.

이 글에서의 설명된 시뮬레이션 결과는 한 전차가 운행될 경우의 결과만 보여주었다. 더 나아가 차량 간의 교환되는 에너지를 살펴보기 위해, 한 레일에서 다수의 전차가 동시 운행되는 연구도 수행 될 것이다.

각각의 전차 모델은 그 속도, 가속도, 경사도 외에 전차의 무게 구름 저항, 공기역학 계수 등과 같은 변수에 의해 필요한 전력을 계산한다. 필요한 전력은 전차 블록의 출력이고, 이것이 급전망에서 전류와 전압을 계산하는 급전망 시뮬레이터 블록의 입력이 된다.

이 프로그램은 일반적인 전차와 하이브리드 전차를 동시에 시뮬레이션 할 수 있다. 하이브리드 모드로 설정되면 전력 공

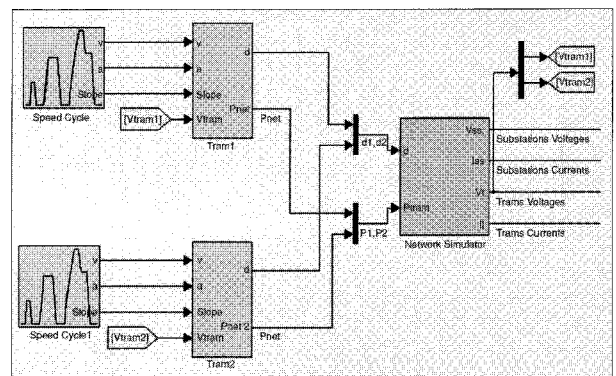


그림 1 Simulink를 이용한 시뮬레이션 모델 구성도^[11]

급 제어가 슈퍼커패시터와 급전망으로부터 공급되는 전력을 제어한다. 에너지 저장량과 급전망 전압 안정화와 같은 변수 또한 설계에서 고려될 수 있다.

제어기에는 두 가지 전략이 모두 구현되며 두 가지를 모두 선택하는 것도 가능하다. 또한, 다른 요소도 생각해 볼 수 있지만 이 글에서는 에너지 절감의 최적화와 슈퍼커패시터가 사용된 에너지 저장 시스템의 최소화에 관한 방법을 제안할 것이다.

슈퍼커패시터 블록은 토폴로지, 모듈을 이루고 있는 셀의 개수 및 특성의 변화에 따라 쉽게 구성될 수 있고 모듈의 특성에 따라 다른 결과가 얻어진다.

5. 필요한 에너지 저장 시스템 크기 결정

에너지 저장 시스템에 필요한 에너지량을 결정하는 방법에는 다양한 접근방법이 있다^[12]. 하이브리드 버스나 자동차 같은 하이브리드 차량에서의 에너지 저장 시스템의 목적은 피크 전력을 처리하여서 디젤 엔진, 연료전지, 배터리 등과 같은 메인 에너지원이 가장 효율적인 점에서 동작하도록 하기 위함이다. 또한, 주 에너지원의 크기를 평균 구동전력에 맞추어 정할 수 있게 하여 주 에너지원을 경량화 시킨다. 그러나 그러한 경우 에너지 저장 시스템에 저장된 에너지가 필요한 경우 피크 전력을 공급할 수 있도록 충분해야 한다.

$$P_{Total} = P_{Average} + P_{ESS} \quad (1)$$

$$P_{ESS} = P_{Total} - P_{Average} \quad (2)$$

전차와 같은 전기 구동 차량은 최대 효율 점에서 운전하는 것에 대한 큰 제약이 없다. 이는 에너지 측면에서 에너지 저장 시스템 구성을 매우 자유롭게 한다. 어쩌면 큰 전류의 필요로 인한 전압강하의 문제가 있을 수도 있지만, 우선은 급전망이 이러한 피크 전력을 감당하는데 매우 충분하다는 것을 전제로 한다.

에너지 저장 시스템의 크기를 최적화하기 위하여 동적 사이징 방법이 제안되었다^[13]. 이 방법은 하나의 충방전 사이클 내에서 슈퍼커패시터 에너지 저장 시스템의 에너지 변화를 고려할 것이고, 전차에서 전력 제어기의 사용을 수반할 것이다^[14]. 이 제어기는 차량의 속도, 슈퍼커패시터의 충전상태(SoC), 요구되는 견인력, 급전망 전압 등과 같은 매개 변수에 따라 에너지 저장 시스템과 전력망 사이의 전력 분배를 관리하게 된다.

일반적인 목적은 제동 에너지의 회생에 있기 때문에, 알고리즘은 다음과 같은 경향을 나타낸다.

- 느린 차량 속도에서의 높은 충전상태 유지
- 빠른 차량 속도에서의 낮은 충전상태 유지

- 자동차의 속도와 출력이 낮을 때, 에너지 저장 시스템의 재충전

6. 전력 흐름 제어기

전차에 설치된 에너지 저장 시스템이 갖는 일반적인 목적에 따라서 다양한 전력 흐름 제어 전략이 있을 수 있다. 제동 에너지의 회생에서 전력 흐름 제어기의 가장 중요한 목적은 슈퍼커패시터의 충전상태를 조절하여 필요할 경우 제동 에너지의 최대량을 저장할 준비를 하는 것일 것이다. 두 번째 목적은, 이 경우, 급전망으로부터 요구되는 피크 전력을 줄이기 위해 저장된 에너지를 사용하는 것이다.

다음과 같은 기준에 따라 동적 전략이 제안 된다.

- 전력이 입력될 때, 즉 제동 전력일 때 그 에너지는 슈퍼커패시터의 충전 상태가 100%보다 작으면 저장된다.
- 요구된 전력이 출력될 때, 즉 구동 전력일 때 그 에너지는 그림 2에서 설명되어 있듯이 급전망과 슈퍼커패시터로 분배된다.

$$P_{Net} = P_{Total} - P_{SC} \quad (3)$$

P_{Net} 은 전기 급전망에 의해 공급된 전력이고, P_{SC} 는 슈퍼커패시터에 의해서 공급된 전력, P_{Total} 은 DC 모션에서 요구되는 전체 전력이다.

그림 2는 슈퍼커패시터의 충전상태 제어 원리를 보여주고 있다. 이는 비례 제어이고, 슈퍼커패시터의 실제 충전상태, 전차의 속도, 그리고 필요한 총 전력과 같은 3가지 입력에 따라 슈퍼커패시터에서 출력되는 전력을 결정한다.

SoC_{REF} 는 차량의 운동 에너지에 의해 결정된다. 제어기는 차량의 속도를 측정하여 현 속도에서 정지할 때의 갑작스런 감속으로 인하여 발생할 수 있는 에너지의 양을 예측하고, 식 (4)와 식 (5)에 의해 원하는 $SoC(SoC_{REF})$ 를 결정하게 된다.

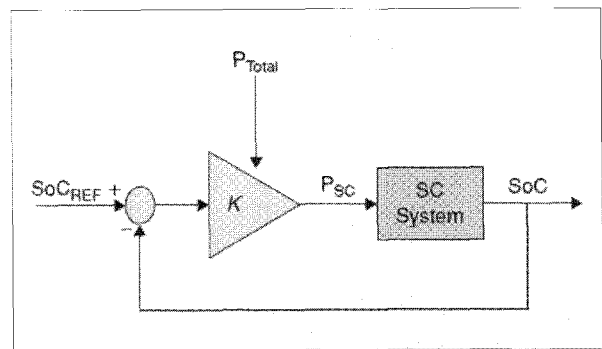


그림 2 전력 제어기 구성도

$$E_{Kinetic Recoverable} \approx K_1 \times E_{Kinetic} \quad (4)$$

$$SoC_{REF} = 1 - \frac{E_{Kinetic Recoverable}}{E_{SC_{MAX}}} \quad (5)$$

K_1 의 값은 차량의 내부손실과 구름저항과 공기역학적 항력 등을 설명한다. 이것은 회생 가능한 에너지가 차량의 운동에너지보다 적은 것을 의미하며, 이 값은 시뮬레이션에서 0.5에

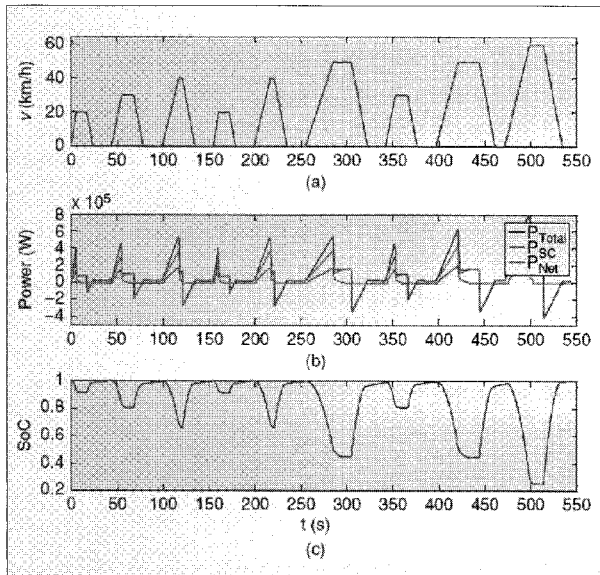


그림 3 전력 제어기 예. (a) 차량 속도, (b) 전력분배 그리고 (c) 슈퍼커패시터 충전상태(SoC) 변화량⁽¹¹⁾

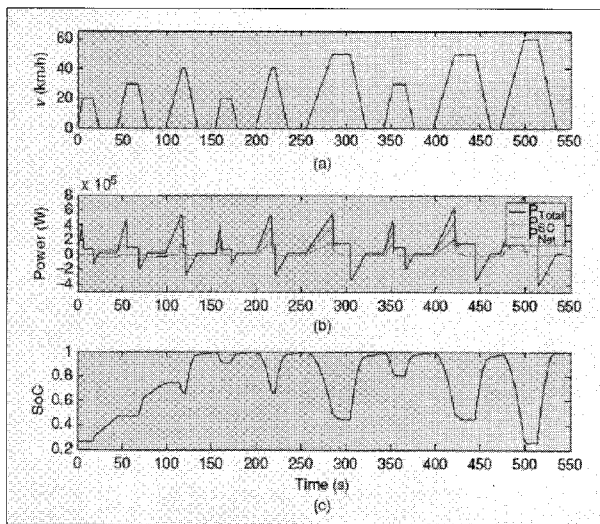


그림 4 슈퍼커패시터의 낮은 초기 충전상태에서의 전력 제어기 동작 특성

서 0.6사이의 값으로 다양하게 조정 된다.

슈퍼커패시터의 충전상태는 다음과 같이 정의된다.

$$SOC = \frac{E_{SC}}{E_{SC_{MAX}}} = \frac{\frac{1}{2} C_{Total} \cdot V_{Total}^2}{\frac{1}{2} C_{Total} \cdot V_{TotalMax}^2} \quad (6)$$

- 정지 상태와 낮은 속도에서 슈퍼커패시터는 충전상태에 반비례하는 전력으로 급전망으로부터 안전하게 재충전될 것이다.

그림 3 및 4는 차량속도와 슈퍼커패시터의 충전상태에 따른 세밀한 전력분배에 대해 보여주고 있다. 그림 4는 사이클의 시작지점에서 슈퍼커패시터 모듈이 방전되어 있고(SoC = 0.25), 충전상태와 차량의 운동에너지가 적절한 관계에 도달할 때까지 차량에 구동력을 제공하지 않음을 보여준다. 그림 4에서 (a)는 차량의 속도, (b)는 전력의 분배(총 전력은 파란색, 슈퍼커패시터는 녹색, 급전망은 빨간색), 그리고 (c)는 슈퍼커패시터의 충전상태 변화를 보여준다.

7. 설계 기준

슈퍼커패시터는 배터리와 비교했을 때 높은 전력밀도와 상대적으로 낮은 에너지 밀도 특성을 보인다.

대략 0.XmΩ의 낮은 내부 저항은 하나의 충/방전 사이클에서 매우 높은 효율을 나타낸다. 기존의 커패시터와 비슷한 에너지 저장에서의 정전기적 특성은 긴 사이클 특성(문헌상 약 100만 번의 충/방전이 가능하다.)의 장점이 있다. 그 밖의 이점은 단자전압 측정을 통하여 식 (6)으로부터 충전상태를 쉽게 알 수 있다는 것이다.

반면에, 슈퍼커패시터 셀은 낮은 전압을 가지고 있어서 응용 조건에 맞는 전압수준에 도달하려면 많은 셀의 직렬연결이 필요하다. 또한, 과전압으로부터 셀을 보호하고 각각의 전압을 유지하기 위한 전압 밸런스 장치의 설치가 필요하다.

7.1 슈퍼커패시터 모듈 설계 기준

- 슈퍼커패시터의 전압변동은 최대전압의 100%와 50% 사이에서 유지되어 질 것이다. 이와 같이 슈퍼커패시터의 가용에너지는 식 (7)에 의해서 총 에너지의 75%일 것이다.

$$E_{Total} = \frac{1}{2} C_{Total} \cdot (V_{Total max}^2 - V_{Total min}^2) \quad (7)$$

- 슈퍼커패시터의 전류는 $0.12 \times I_{ShortCircuit}$ 를 넘어서는 안 된다⁽¹³⁾.

- 절감되는 에너지 계산을 위해서 슈퍼커패시터의 전력 손실과 수명을 고려될 것이다.
- 에너지 저장 시스템의 최대 전압은 DC/DC 전력변환기의 설계를 용이하게 하기 위해 급전망 전압(무부하 시 700V)보다 낮아야 한다.

8. 가정

- 절감된 에너지 계산을 위한 드라이빙 사이클은 정류장 사이의 거리를 고려하여 브뤼셀의 23번 도로에서의 전차를 기반으로 하고 있으나, 교통 상황이나 도로 간의 고도에 관한 부분은 고려되지 않았다. 그림 5는 도로에서의 속도 특성을 보여주고 있다. 그것은 노면과 터널로 구성되어 있으며, 터널 구간에서의 최대속도는 60km/h로, 노면 구간에서는 최대속도 50km/h로 가정하였다. 정류장 사이의 거리가 300m 이하일 때, 최대 속도는 30km/h로 한다. 정류장에 정차시간은 20초 이고, 평균 속도는 23km/h이다.
- 이번 연구에서 고도의 차이는 고려되지 않았다. 그것들은 추후에 더 연구되어 질 것이나, 슈퍼커패시터를 기반으로 한 에너지 저장 시스템이 가용한 위치에너지 전부를 수용할 수 있도록 충분한 용량을 가지지 못할 것이라고 예상된다.
- 시뮬레이션 급전망은 고가선으로 연결된 매 1.5km마다의 변전소로 구성되어 있다.
- 한 레일에는 오직 한 전차만 운행되고 있다. 현재 급전망으로 에너지가 피드백 되는 가능성도 연구되어 지고 있으나 이 글에서 그 결과는 제외하였다.
- 달리 지정되지 않는 한 차량의 보조전력은 측정된 전차의 평균치에 해당하는 23kw로 설정될 것이다.

9. 에너지 고찰 사항

전차의 제동 단계에서 재생되는 에너지는 식 (8)과 식 (9)로부터 주어지는 운동에너지와 위치에너지 일 것이다.

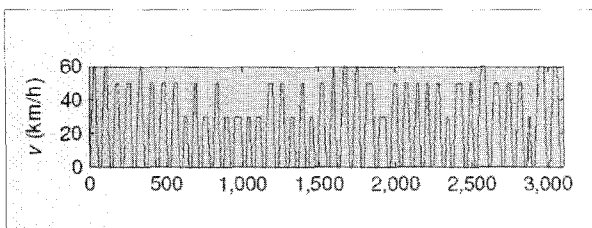


그림 5 시뮬레이션에서 사용된 교유의 속도 사이클. 이는 브뤼셀의 23번 도로를 기반으로 한다^[11].

$$E_{Kinetic} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v^2 \tag{8}$$

$$E_{Potential} = M \cdot g \cdot h \tag{9}$$

일반적인 설계 기준은 에너지 저장 시스템이 차량의 운동에너지를 회생할 수 있어야 하는 것이다. 최악의 경우, 최고 속도 70km/h와 단위면적당(m²) 4명의 사람을 태운 51,800kg의 차량의 경우 운동에너지는 2.72 kWh이다.

그러나 전차의 최대속도는 70km/h가 되기 힘들고 노면에서는 50km/h를 거의 넘지 않으므로, 노면과 터널에서 제한 속도를 60km/h로 설정하는 것은 적절하다. 게다가, 운동에너지의 일부는 구름저항과 공기역학 그리고 차량 내부 손실에 의해 소비된다. 회생에너지는 전부하의 전차가 60km/h에서 0km/h로 감속할 때 시뮬레이션에 의해 결정되어지고 이러한 조건에서 에너지 저장 시스템에 저장되는 에너지는 1.14kWh이다.

여타의 설계 기준을 적용하는 것도 가능할 것이다. 예를 들어 위치에너지를 고려한다거나 시스템이 어떤 에너지적인 간극 또는 연결고리가 없는 부분을 감당할 수 있는 에너지를 제공할 수 있도록 보장하는 것 등이다. 후자의 경우는 설계 기준에 추가적인 목표가 더해지지만 본 설계에서는 고려되지 않았다.

10. 제안된 구성

최종적인 절감 에너지의 계산에서 에너지 저장 시스템의 크기에 의한 영향을 평가하기 위해서 4가지의 모듈이 제안되었다. 각 모듈의 크기는 현재 브뤼셀에서 유료 운행 중인 길이 31.8m, 공차중량 38.6톤의 전차를 기반으로 전술된 기준에 따라 정해질 것이다. 문헌상에서는 이와 유사한 전철선로를 위한 슈퍼커패시터 에너지 저장장치 중 가용 에너지의 양이 0.97kWh[15]~1.5kWh[16] 범위에서 변화하는 서로 다른 크기를 가진 시스템들이 나타나 있다.


10.1 옵션 A : 1.2kWh 중간 크기

시스템은 에너지에 있어서 1제곱 미터당 4명의 사람이 승차해 있는 전차의 속력이 60km/h~0km/h까지 감속할 경우의 전차로부터 얻을 수 있는 모든 회생제동 에너지를 저장하기 위해 필요한 최소한의 크기를 갖는다.(표 1 참조). 그림 6은 SORT 드라이빙 사이클에서 슈퍼커패시터 모듈의 성능을 보여준다. 이 사이클은 버스를 위한 것이지만 여기에서는 서로 다른 속도에 따른 동작 연구를 위해 사용되었다. 이런 구성으로 사용시, 최대 전류는 350A이고, 제조사에서 명시한 내부저항을 고려하면 돌아오는 여행의

효율은 96.7%이다. 슈퍼커패시터간 연결저항은 고려되지 않았다.

표 1 슈퍼커패시터 Option A

TABLE 1 Supercapacitor Option A.	
Cells:	$C = 2000F, V_{max} = 2.5V$
Configuration:	four strings \times 232 cells in series
Usable energy:	1.2 kWh
Max voltage:	580 V
Cells weight:	371 kg



2000F
Maxwell
SC

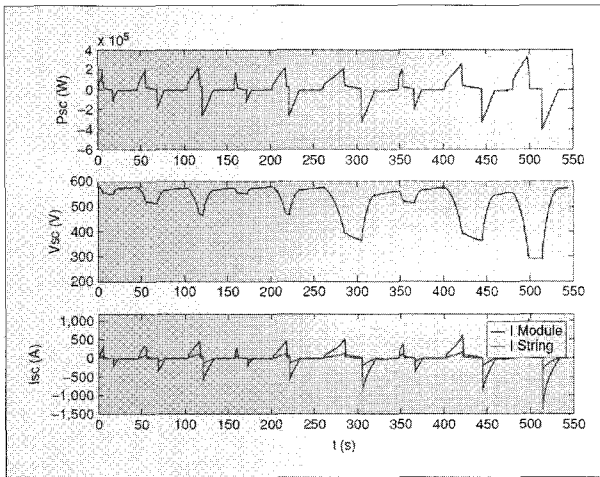


그림 6 드라이빙 사이클 운영 시 슈퍼커패시터 모듈의 동작 특성⁽¹¹⁾

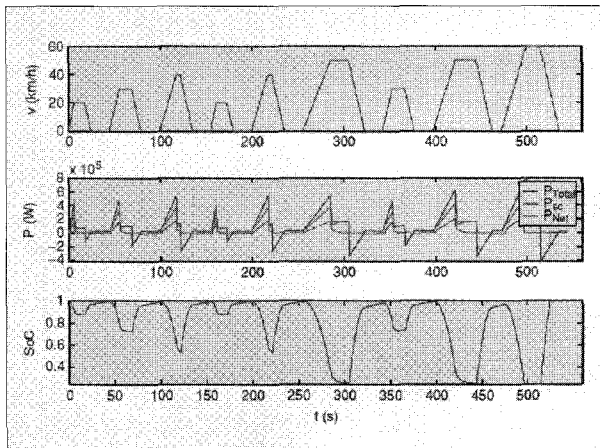


그림 7 슈퍼커패시터가 수명을 다했을 경우(EoL)에서의 하이브리드 전차의 전력흐름⁽¹¹⁾

10.2 옵션 A : 중간 크기, (EoL: end-of-life)

슈퍼커패시터의 수명이 다한 시점(EoL: end-of-life)이 극적 파괴의 형태로 나타나지는 않았지만 성능의 감소로 나타났다. 공칭용량은 30% 감소하고 내부등가직렬 저항(ESR)은 100% 증가한다. 그림 7과 8은 EoL에서의 옵션 A를 보여준다. 용량이 감소되고 내부저항이 두 배가 된 상황에서도 슈퍼커패시터를 기반으로 한 에너지 저장 시스템의 성능은 양호함이 관찰된다. 에너지 저장시스템은 50km/h 이하의 속력에서 만족스럽게 동작한다. 이런 상황에서는 모든 제동 에너지를 회생 할 수 있지만, 속력이 빨라지면 그 용량이 제동 에너지를 저장하기에는 충분하지 않아 에너지의 일부가 소실된다.

에너지 절감 비율은 개발된 사이클에 따라 많은 영향을 받을 것이다. 다시 말하지만 결과는 23kW의 보조전력과 단위 면적당(m²) 4명의 사람에 의해 전부가 걸린 T3000 전차일 경우에 근거한다. 이때의 왕복 여행 효율은 92.6%이다.

10.3 옵션 B : 1.23kWh 중간 크기 대응

기본 기준은 옵션 A와 같다. 그러나 각각의 셀을 사용하는 대신에, Maxwell사에서 제조된 모듈이 사용되었다⁽¹¹⁾. (표 2 참조)

10.4 옵션 C : 1.56kWh 큰 크기

시스템은 단위 제곱미터당(m²) 6명의 사람이 탑승했고, 속력이 65km/h~0km/h까지 감속할 경우 전차에서 얻을 수 있는 모든 회생제동 에너지를 저장하기 위해 필요한 최소한의 크기를 갖는다⁽¹¹⁾. (표 3 참조).

10.5 옵션 D : 0.91kWh 작은 크기

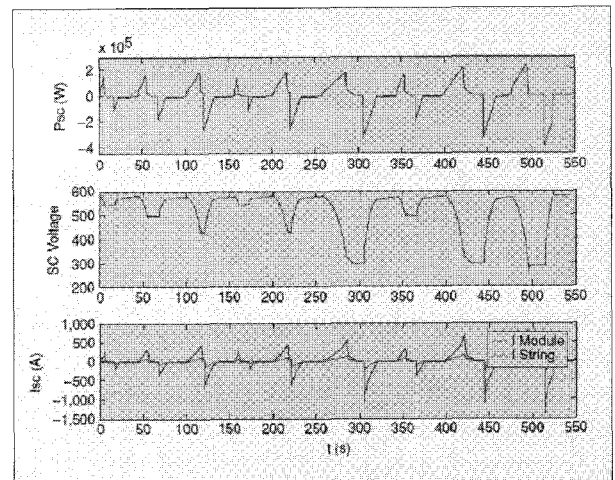
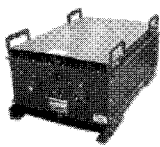


그림 8 수명이 다했을 경우(EoL) 슈퍼커패시터 모듈의 동작특성⁽¹¹⁾

표 2 슈퍼커패시터 Option B

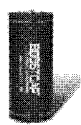
TABLE 2 Supercapacitor Option B	
Built-in modules:	125V; C = 63F
Configuration:	three strings × 4 modules in series
Usable energy:	500 V
Max voltage:	1.23 kWh
Cells weight:	371 kg
Modules weight:	696 kg (including cells, connection inside the modules, packaging and cooling)



Maxwell HTM
125 V

표 3 슈퍼커패시터 Option C


TABLE 3 Supercapacitor Option C	
Cells:	C = 3000F, V _{max} = 2.5V
Configuration:	four strings × 200 cells in series
Usable energy:	1.56 kWh
Max voltage:	500 V
Cells weight:	440 kg



Maxwell
3000F cell

표 4 슈퍼커패시터 Option D

TABLE 4 Supercapacitor Option D	
Cells:	C = 1500F, V _{max} = 2.5V
Configuration:	four strings × 234 cells in series
Usable energy:	0.91 kWh
Max voltage:	585 V
Cells weight:	300 kg



Maxwell
1500F cell

시스템은 단위 제곱미터당(m²) 4명의 사람의 부하가 있고, 속력이 50km/h~0km/h까지 감속할 경우의 전차에서 얻을 수 있는 모든 회생제동 에너지를 저장하기 위해 필요한 최소한의 사이즈를 갖는다⁽¹¹⁾. 이때의 최소 에너지는 0.91kWh이다⁽¹¹⁾.(표 4 참조).

11. 결 과

에너지 절감의 시뮬레이션 결과는 많은 요인에 의해서 달라진다. 드라이빙 사이클, 차량 부하, 에너지 저장 시스템의 크기와 구성 방법, 교통상황, 차량 내부 손실, 그 외의 보조 전

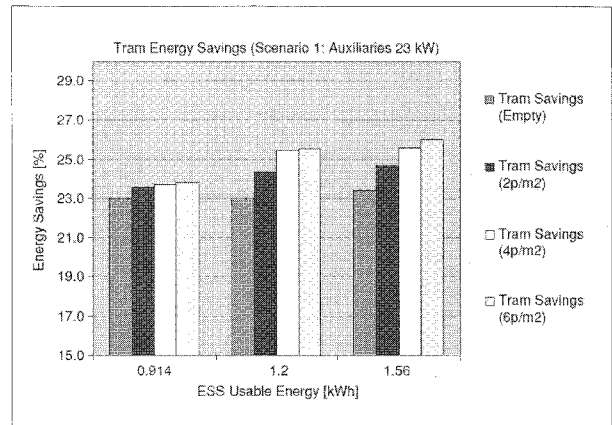


그림 9 에너지 저장 장치 크기에 따른 에너지 절감 무게의 영향 또한 각 그룹에 따라 보여주고 있다⁽¹¹⁾

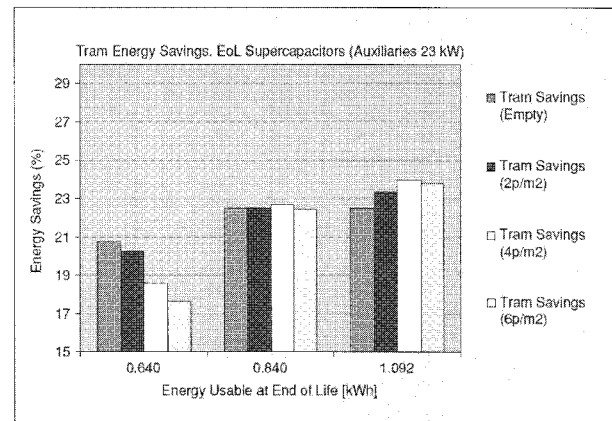


그림 10 슈퍼커패시터가 수명을 다했을 때의 에너지 저장 장치 크기에 따른 에너지 저장량과 각각의 크기에서 부하에 따른 영향⁽¹¹⁾

력 소모 등이 최종 결과에 많은 영향을 줄 수 있다. 몇몇의 파라미터에 대한 민감도 분석이 수행되었다.

11.1 ESS 크기에 따른 에너지 저장량

그림 9는 에너지 절감량과 사용된 에너지 저장 시스템 및 보조 에너지의 소비량이 측정된 평균인 23kW로 가정할 때의 차량 부하 사이의 관계를 보인다. 그림 10에서는 슈퍼커패시터가 수명을 다했을 경우(EoL)의 결과를 보여준다.

그림 9를 보면 전차가 비었을 경우는 에너지 절감 비율은 사용된 에너지 저장 장치와 관계없이 대략 23%인 반면에, 단위 제곱미터당(m²) 6명이 탑승했을 경우에는 에너지 절감량이 23.8%(작은 사이즈 사용: 0.91kWh)에서 26%(큰 사이즈 사용: 1.52kWh)까지 다양하다.

이 결과는 같은 에너지 저장 시스템을 사용할 경우 에너지

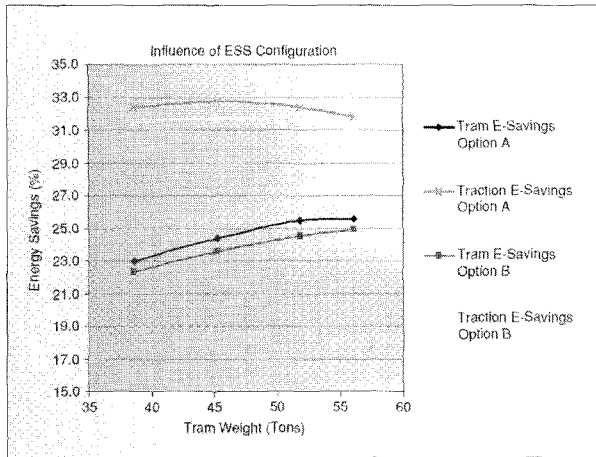


그림 11 전차 부하, 에너지 저장 시스템 구성 그리고 차량 보조 소비 전력에 따른 에너지 절감. 위의 그래프(노란색과 파란색)는 정지 마찰 에너지만 고려하였다. 즉, 보조 소비 전력은 고려되지 않았다^[11]

절감량은 차량의 무게에 따라 증가한다는 것을 의미하고 이는 큰 사이즈의 옵션의 경우는 분명히 드러난다. 그러나 작은 사이즈의 옵션에서는 그 차이가 크지 않다. 이는 큰 차량 부하에서 모든 제동 에너지가 에너지 저장 시스템에 저장될 수 없고, 따라서 에너지 절감량이 줄어들기 때문이다. 이것은 작은 사이즈 옵션의 EoL에서 분명히 드러난다. 여기서는 일반적인 경우와 달리, 차량 부하가 증가했을 경우 에너지 절감량이 줄어든다. 이것은 에너지 용량의 감소 때문이다.

11.2 에너지 저장 시스템 구성 방식의 영향

또 하나의 주목할 만한 사실은 그림 11에서 나타난다. 슈퍼커패시터의 모듈 구성은 최종적인 에너지 절감에 있어서 매우 중요한 영향을 미친다. 또한 이는 옵션 A와 B의 차이점으로도 알 수 있다. 옵션 A와 B는 거의 같은 에너지 용량을 가지고 있어도 그 결과는 다르다. 그것은 옵션 A의 효율이 B보다 높기 때문이며, 모듈 구성 방법의 차이로 옵션 A에 흐르는 전류의 크기가 옵션 B보다 작아서이다. 이것이 옵션 A가 옵션 B보다 효율적으로 만들며, 슈퍼커패시터 모듈의 구성 토폴로지가 결과에 얼마나 중요한 영향을 주는지 보여준다.

그것은 또한 전차의 견인에너지만 고려된다면(보조 에너지는 고려되지 않는다.) 에너지 절감은 30% 이상이 될 수 있다는 것을 보여준다. 보조 에너지는 회생에 되지 않기 때문에 보조 에너지 소비가 낮을수록 높은 에너지 절감으로 이어질 수 있다.

11.3 드라이빙 사이클의 영향

최종 에너지 절감에서 드라이빙 사이클에 의한 영향을 보기

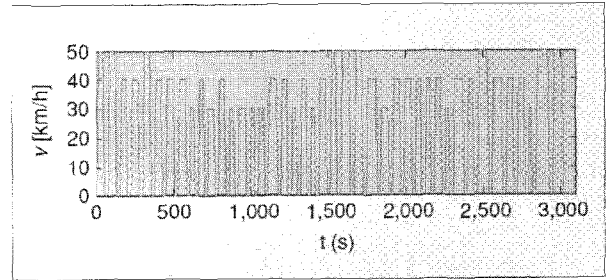


그림 12 다른 드라이빙 사이클. 저속 사이클^[11]

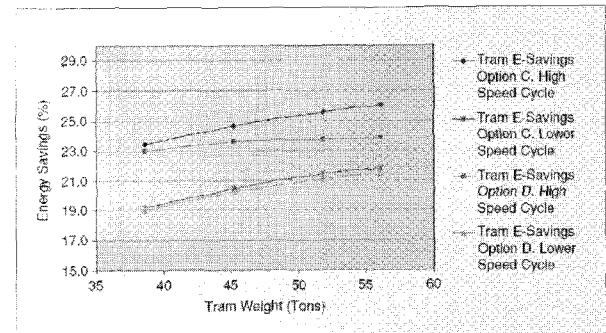


그림 13 드라이빙 사이클과 에너지 절감^[11]

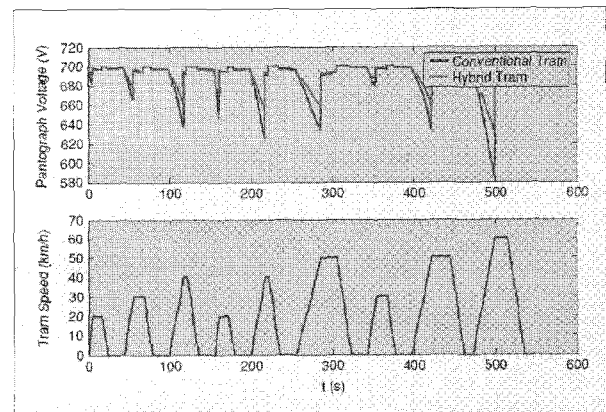


그림 14 전차 집전기에서의 전압강하^[11]

위해서 같은 도로를 기반으로 다른 드라이빙 사이클의 시뮬레이션에 의한 사례 연구가 진행되었다. 이번에는 터널에서의 최대 속도를 50km/h로 도로에서는 40km/h로 그리고 정류장 사이와 같은 짧은 거리에서는 30km/h로 설정을 하였다. 가속도는 차량의 중량에 따라서 최대로 하였고, 0.84m/s²와 1.17m/s² 사이에서 변화한다. 이러한 가속도는 이전 사이클의 완만한 가속도 0.7m/s²보다 매우 높은 수치이다. 두 사

이클의 구분을 위해서 글 후반부부터는 이전의 사이클은 고속 사이클이라 부르고, 그림 12에 나타난 것은 저속 사이클이라 부를 것이다.

그림 13은 두 사이클에서의 에너지 절감을 보여준다. 에너지 절감은 높은 속도에서 더 크다. 이는 고속 사이클의 운동 에너지가 더 높기 때문이며, 재생 가능한 에너지도 낮은 속도의 사이클보다 더 높기 때문이다. 시뮬레이션은 23kW의 보조 소비전력을 포함하여 실행되었다.

옵션 C(1.56kWh)와 D(0.91kWh) 또한 이 두 사이클을 이용하여 비교된다. 고속 사이클에서 옵션 C가 차량 부하가 클 때 옵션 D보다 더 좋은 효율을 가진 것은 이전에 보였다. 그러나 저속의 사이클에서는 부하에 의한 차이가 거의 없다. 이는 저속 사이클에서는 모든 제동 에너지가 옵션 D에서도 저장될 수 있다는 것을 설명한다.

그림에서 도시된 모든 값들이 전차에서의 에너지 절감량에 해당한다는 것도 중요한 사실이다. 그림이 너무 혼잡해 지는 것을 피하기 위해서 변전소에서의 절감량을 보여주지는 않았지만 이는 전차의 경우 보다 1~2% 높다. 변전소에서 보다 낮은 전류의 순환으로 인해 손실이 적어지기 때문에 에너지 절감량이 높은 것이다.

11.4 전압 강하의 감소

전압 강하의 감소가 주된 목적이 아니고 제어 알고리즘에서도 급전망의 전압을 고려하지 않지만, 전압강하는 급전망으로 부터의 보다 작은 피크 전력을 요구하게 된 결과로 줄어든다. 그림 14에서는 한 라인에 한 대의 전차만이 운행되고 있을 때의 전압 강하를 보여주며, 가속 구간에서 전압 강하는 거의 절반 수준으로 나타난다. 파란색의 그래프는 일반 전차의 결과를 보여주고 빨간색은 하이브리드 전차의 결과를 나타낸다.


12. 결론

앞선 결과에서 알 수 있듯이, 모든 조건에서 최적화 된 에너지 저장 시스템의 선택은 그리 간단하지 않다. 전차의 승객의 평균수가 단위 제곱미터당(m^2) 4명 미만이라고 가정하였을 때 옵션 A(중간 크기, 1.2kWh)는 EoL(end-of-life)에서도 좋은 성능을 보이기 때문에 좋은 선택이라고 생각된다. 옵션 D(작은 크기, 0.91kWh)의 주요한 문제는 EoL에서 정전 용량의 저하로 인해서 시스템 성능을 저하시키는 에너지 용량 손실이 생기는 것이다.

옵션 C(큰 크기, 1.56kWh)는 성능만을 고려하였을 경우 최고의 선택이다. 하지만 평가될 필요가 있는 것은 특정 상황(큰 부하, EoL)에서 이 모듈의 가격과 무게를 보상할 만큼의 유리한 이점을 갖느냐는 것이다. 또한 이 옵션은 다른 전략

(전압균형 보상, 침투 전력 절감, 가공전선이 없는 경우에서의 자율성)이 고려되어야 하는 경우 좀 더 유연성을 제공할 수 있을 것이다.

1.2kWh의 옵션 A와 B를 비교를 해보면 상당히 다른 결과가 관찰되었다. 그러므로 슈퍼커패시터 모듈의 효율은 결과에 중요한 영향을 미치며 따라서 구성에 있어서도 중요하다.

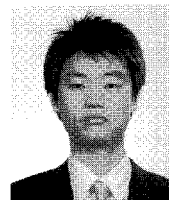
드라이빙 사이클은 슈퍼커패시터의 모듈 선정과 최종 결과에 있어서 매우 중요하다. 만약 차량이 60km/h 이상의 속도를 낸다면, 에너지 저장 시스템의 용량이 1.2kWh 이상의 되어야 그 이점이 드러났다. 한편, 차량이 거의 50km/h 이상의 속도를 내지 않는다면, 그 이점은 생각보다 두드러지지 않고 더 낮은 용량의 시스템이 저속 사이클에서 옵션 D의 성능에 의해 보인 것과 같은 비슷한 결과를 나타낼 것이다. 

참고 문헌

- [1] J. Van Mierlo and G. Maggetto, L. Verechken, V. Favrel, S. Meyer, and W. Hecq, "How to define clean vehicles? Environmental impact rating of vehicles", *Int. J. Automotive Tech.*, Vol 4, No. 2, pp. 77-86, 2003.
- [2] J. Van Mierlo and J.-M. Timmermans et al., "Environmental Rating of vehicles with different alternative fuels and drive trains: A comparison of two approaches", *Transportation Res. Part D*, Vol. 9, No. 5, pp. 387-399, 204.
- [3] W. Günselmann, "Technologies for increased energy efficiency in railway systems", in *Proc. EPE 2005, Dresden, 2005*. [CD-Rom].
- [4] J.W. Dixon and M.E. Ortuzar, "Ultracapacitors DC-DC converters in regenerative braking system", *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, Vol. 17, No. 8, pp. 16-21, Aug. 2002.
- [5] A. Burke, "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology", *J. Power Sources*, Vol 91, No. 1, pp. 37-50, Nov. 2000.
- [6] A. Rufer, D. Hotelier, and P. Barrade, "A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 19, No. 2, pp. 629-636, Apr. 2004.
- [7] A. Rufer, P. Barrade, D. Hotelier, and S. Hauser, "Sequential supply for electrical transportation vehicles: Properties of the fast energy transfer between supercapacitive tanks", *J. Circuits Syst.*

- Comput., Vol 13, No. 4, pp. 941-955, Aug. 2004.
- [8] A. Rufer and P. Barrade, "A supercapacitor-based energy-storage system for elevators with soft commutated interface", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 38, No.5. pp. 1151-1159, Sep-Oct. 2002.
- [9] J. Van Mierlo and G. Maggeto, "Innovative iteration algorithm for a vehicle simulation program", IEEE Trans. Veh. Technol., Vol 53, No. 2. pp. 401-412, Mar. 2004.
- [10] J. Van Mierlo, P. Van den Bossche, and G. Maggeto, "Models of energy sources for EV and HEV: Fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators", J. Power Sources. Vol. 128, No. 1, pp. 76-89, Mar. 29 2004.
- [11] R. Barrero, J. Van Mierlo, and X. Tackoen, "Supercapacitors on-board light rail vehicles: enhanced energy storage systems for improved vehicle efficiency", in Proc. IEEE/ASME Joint Rail Conf., Wilmington, April 2008. [CD-Rom].
- [12] H. Douglas and P. Pillay, "Sizing ultracapacitors for hybrid electric vehicles", in Proc. IECON 2005. 31st Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics Society, 6-10 Nov. 2005. [CD-Rom].
- [13] Y. Cheng and J. Van Mierlo, et al., "Configuration and verification of the super capacitor based energy storage as peak power unit in hybrid electric vehicles", in Proc. European Conf. Power Electronics and Applications 2007 (EPE 2007), Aalborg, 2007. [CD-Rom].
- [14] Y. Cheng and J. Van Mierlo et al., "Energy sources control and management in hybrid electric vehicles", in Proc. Int. Power Electronics and Motion Control Conf. (EPE PEMC) 2006, Portoroz, Slovenia, 2006, pp. 524-530.
- [15] B. Destraz, P. Barrade, and A. Rufer, Klohr, "Study and simulation of the energy balance of an urban transportation network", in Proc. European Conf. Power Electronics and Applications 2007 (EPE 2007), Aalborg, 2007. [CD-Rom].
- [16] M. Steiner and J. Scholten, "Energy storage on board of railway vehicles", in Proc. European Conf. Power Electronics and Applications 2005 (EPE2005) Dresden, 2005. [CD-Rom].

〈 필 자 소 개 〉



김상현(金尙鉉)

1981년 7월 14일생. 2008년 숭실대 전기공학부 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전기공학부 석사 과정.