

냉각팬 전동화에 따른 시내버스 연비효과 예측

이용규^a, 박진일^{a*}, 이종화^a

Prediction of the Effect of Cooling Fan Electrification on City Bus

Yongkyu Lee^a, Jinil Park^{a*}, Jonghwa Lee^a^a Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	10	October	2013
Revised	21	October	2013
Accepted	24	October	2013

Keywords:

Viscous cooling fan
Electric cooling fan
Fuel economy
Simulation
Regenerative braking

ABSTRACT

Because of their longer operating times and larger size relative to conventional fans, the cooling fans mounted in buses consume larger amounts of energy. Most of the cooling fans mounted in a bus are connected to the engine by a viscous clutch. A viscous cooling fan's speed is determined by its fluid temperature, which is affected by the air flow through the radiator. The fan does not react immediately to the coolant temperature and in doing so causes unnecessary energy consumption. Therefore, the fuel economy of buses using viscous fans can be improved by changing to an electric cooling fan design, which can be actively controlled. In addition, electric power consumption is increased by using electric cooling fans. Thus, when electric fans are applied in conjunction with the alternator management system (AMS), the fuel economy is further enhanced. In this study, simulations were performed to predict coolant temperature and cooling fan speeds. Simulations were performed for both viscous and electric cooling fans, and power consumption was calculated. Additionally, fuel economy was calculated applying both the alternator management system and the electric cooling fan.

1. 서론

버스는 엔진이 차량 뒤쪽에 위치하기 때문에 주행 시 엔진룸으로 공기의 흐름이 자연적으로 크게 발생하지 않는다. 따라서 냉각수 냉각을 위한 공기량 확보가 어려워 냉각팬의 의존도가 크고, 엔진의 출력이 높아 열 발생양도 많기 때문에 냉각팬의 크기가 크고 이에 따른 소모동력도 크다. 그러므로 냉각팬의 소모동력을 줄인다면 승용차에 비해 큰 수치로 연비가 향상될 수 있다^[1].

버스에 장착된 냉각팬을 살펴보면 풀리와 벨트를 통해 엔진에 직결되어 동작된다. 따라서 냉각팬의 속도는 엔진의 회전수에 따라

결정되고 이는 냉각이 필요 없을 때 불필요한 에너지 소모를 야기한다. 이에 현재 대부분의 버스에는 유체클러치를 이용하여 냉각팬의 속도를 간접적으로 제어한다. 하지만 유체클러치 냉각팬의 경우 냉각수의 온도에 의해 냉각팬 회전속도가 결정되는 것이 아니라, 라디에이터에서 통과된 공기의 온도에 의해 회전속도가 결정되므로 냉각수온도 변화에 따른 회전속도 변화 반응이 느리다. 이 때문에 냉각수 온도가 낮아 써모스텝이 닫힌 지점에서 냉각팬이 빠른 속도로 회전하거나 냉각수 온도가 높지 않아도 회전속도가 빠른 경우가 있으며 이는 불필요한 에너지 소모를 발생시킨다. 따라서 냉각팬의 회전속도를 능동적으로 조절할 수 있는 전동식 냉각팬을

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2337

Fax: +82-31-219-2351

E-mail address: jpark@ajou.ac.kr (Jinil Park).

장착한다면 이에 따른 소모동력이 저감되고 연비개선 효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 시내버스에 장착된 냉각팬의 작동영역과 냉각수 온도 특성을 파악하고 냉각수 온도를 예측할 수 있는 시뮬레이션을 개발하였다. 개발된 시뮬레이션을 이용하여 전통식 냉각팬을 장착할 경우 변동 되는 냉각수 온도를 예측하고 냉각팬의 작동영역을 파악하여 감소하는 소모에너지 양을 분석하고 확인하였다.

2. 시뮬레이션 모델링

본 연구의 대상차량은 시내노선을 운행하는 버스로 10리터 5단 수동변속기가 장착된 CNG 버스이다. 출력은 290마력으로 엔진룸이 차량의 뒤쪽에 위치하며 유체클러치 방식의 냉각팬이 장착되어 있다.

2.1 기존 냉각시스템 고찰

기존 냉각시스템은 유체클러치 방식의 냉각팬이 장착되어 있기 때문에 온도에 따른 냉각팬 회전속도 반응이 느리고 이에 따른 불필요한 에너지 소모가 발생되었다. Fig. 1은 시험차량으로 시내노선을 주행하는 동안 측정된 냉각수 온도와 냉각팬의 회전속도이다.

주행 시간 1,200~1,300초 부근을 보면 냉각팬의 회전속도가 높은 것을 확인할 수 있는데 이 때 냉각수 온도는 써모스텝이 완전히 개방되는 않는 82~85도이다. 이는 냉각팬의 속도를 결정하는 유체클러치가 냉각수의 온도에 의해 작동되는 것이 아니라 라디에이터를 통과한 공기온도에 의해 작동되기 때문이다. 유체클러치는 온도에 따라 변동되는 내부 점성을 이용하여 엔진에서 냉각팬으로 전달하는 속도비를 조절한다. 이 때 유체클러치 내부에 존재하는 점성 유체의 열용량이 있어 라디에이터를 통과한 공기로 점성유체를 식히기 위해 시간이 소요된다. 이 때문에 냉각수 온도가 낮아져

서 냉각팬의 속도가 줄어야 함에도 불구하고 냉각팬 회전 속도가 줄어들기 까지 약 150초의 지연시간이 발생하였다. 냉각팬의 소모동력이 큰 버스의 경우 이러한 현상은 연비에 악영향을 끼치며 이러한 현상을 줄일 수 있다면 연비 향상에 도움이 된다.

2.2 시뮬레이션 구성

냉각팬에 의한 소모동력은 대부분 회전속도에 의해 결정되기 때문에 소모량을 예측하기 위해서 냉각팬의 회전속도를 예측하여야 한다. 그리고 냉각팬의 회전속도는 냉각수 냉각량에 의해 결정되므로 이를 예측하기 위해서 냉각수의 온도를 예측할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 냉각수 온도를 시뮬레이션 하고 이에 따른 냉각량을 조절하기 위해 냉각팬 회전속도를 예측할 수 있는 모델을 Mathwok사의 MATLAB Simulink 프로그램을 이용하여 구성하였다.

냉각수 온도는 엔진에서 발생한 열, 라디에이터의 냉각효율, 냉각수 펌프의 특성, 써모스텝의 열림각, 차량속도, 외기온, 냉각팬의 속도 등이 긴밀히 연관되어 결정된다^[2]. 따라서 위의 사항이 포함된 에너지 수식 모델링을 수행하였으며, 이를 식 (1)에 나타내었다.

$$\dot{Q}_C = k_1 \dot{Q}_{Eng\ heat} + k_2 \dot{Q}_{Eng\ oil} + k_3 \dot{Q}_{Rad} + k_4 \dot{Q}_{HC} + k_5 \dot{Q}_{etc} + k_6 \dot{Q}_{EGRC} \quad (1)$$

Q : Quantity of heat, J/s

k : proportional constant

C : coolant

Eng heat : engine heat generation

Eng oil : engine oil

Rad : radiator

HC : Heater Core

EGRC : EGR cooler

냉각수는 크게 엔진에서 발생한 연소열량의 일부와 엔진오일 열량 일부, EGR 가스 열량 일부를 받아 온도가 상승하고 라디에이터와 히터코어에서 방열되어 온도가 하강된다. 그 외에 배관 및 엔진블록에서 외부공기와 교환되는 열량도 있지만 위 항목에 비해 매우 작은 양으로 모델링에서는 무시하였다. 또한 실험 조건에서 차량 주행 중에 히터를 동작하지 않았으므로 히터에서 교환된 열량은 0이다.

남은 항목들의 계수를 구하기 위해 먼저 엔진에서 발생한 연소열량에서 냉각수가 흡수한 열량을 도출하는 k_1 을 구하였다. 엔진이 냉각된 상태에서 부하에 따라 증가되는 냉각수 온도를 실차실험을 통해 측정하여 ECU에서 송출되는 IMEP 관련 계산된 값과 상관 계수를 도출하였다. 이 때 엔진오일과 엔진블록에 의해 영향을 받

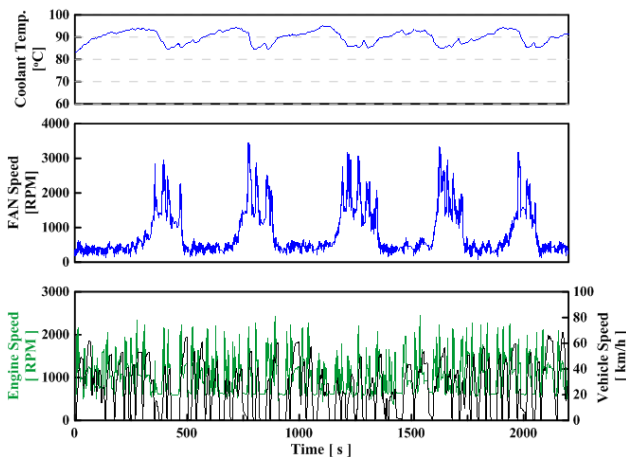


Fig. 1 Coolant temperature and fan speed on city bus which is equipped with viscous cooling fan

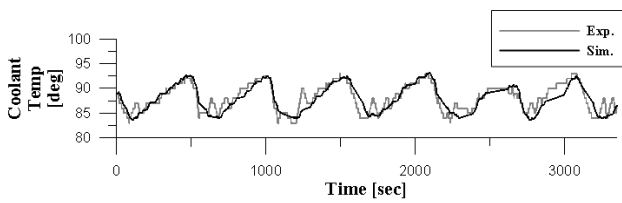


Fig. 2 Comparison of coolant temperature between simulation and experiment

는데 그 값은 각각 질량과 온도변화를 통해 계산하여 앞서 구한 상관계수와 보정하여 k_2 를 구하였다. k_3 와 k_5 는 열교환기에 해당되는 효율로 ϵ -NTU 기법을 통해 계산된 수치를 이용하였다^[3]. 그 외에 모델링에 필요한 수치로 냉각수와 엔진오일 유량은 엔진회전 속도에 따라 모델링하였고, 외기온도, 현재 냉각수 온도, 냉각팬 회전 속도 등 온도에 영향을 주는 요소들을 함께 고려하였다^[4]. 이와 같이 수립된 모델링을 Simulink로 구성하였으며, 이를 이용하여 기존 시스템의 냉각수 온도를 예측하고 실측값과 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 시뮬레이션의 냉각수 온도는 실측값 온도와 피드백 없이 초기 온도와 주행 정보를 통해 예측되는데 그림에서 확인할 수 있듯이 실측된 냉각수 온도에 크게 벗어나지 않고 잘 일치되는 것을 확인할 수 있다.

실측값과 비교하여 검증된 시뮬레이션 모델을 이용하여 냉각팬 회전속도를 예측하였다. 실험 시 외기온과 주행노선에 따른 엔진 부하를 고려해 볼 때 냉각팬 회전속도가 1,400 RPM 이면 냉각수를 충분히 냉각시킬 수 있으므로 전동식 냉각팬 최대 회전 속도는 1,400 RPM으로 설정하였다. 냉각팬의 회전속도를 올리는 지점은 냉각수 온도 95도로 설정하였으며, 냉각수 온도에 따라 냉각팬의 속도가 선형적으로 변하는 것이 아니라 95도 이상일 경우 1,400 RPM으로 동작하여 90도가 되면 회전속도가 줄어들도록 2단으로 구성하였다. 승용차와 다르게 외부에서 엔진룸으로 유입되는 공기량이 차속이 높아도 거의 발생하지 않으므로 냉각팬은 시동 중엔 항상 회전하도록 설정하였으며, 회전 속도는 기존 냉각팬 회전속도와 동일한 250 RPM으로 설정하였다.

버스에 장착된 교류발전기의 용량은 대부분 5 kW급으로 28 V로 동작된다. 냉각팬이 장착되어 전장 부하가 높아지게 되면 현재 장착된 교류발전기 용량으로 전기 발생량이 부족하므로, 용량을 증가시켜야 한다. 전동모터의 효율을 95%로 가정하였을 때 냉각팬이 1,400 RPM으로 동작할 경우 약 5 kW 전력을 소비하므로 교류발전기의 용량을 기존에서 5 kW 증가된 10 kW급으로 모델링하였다.

3. 전동팬 적용에 따른 효과 분석

구성된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 전동식 냉각팬으로 교

체될 경우 소모되는 에너지양을 분석하여 기존 냉각팬에 비해 줄어든 연료량을 확인하였다. 또한 현재 승용차에 활발히 적용되고 있는 발전제어 기술을 적용하였을 때 발생하는 전기에너지를 이용하여 전동냉각팬을 동작할 경우 줄어드는 연료량도 확인하였다.

3.1 전동식 냉각팬 적용에 따른 효과

구성된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 동일한 운전조건에서 전동팬을 적용할 경우 변동되는 냉각수 온도와 냉각팬 회전속도를 Fig. 3에 나타내었다.

유행이 완료된 후 냉각수 온도는 90~95도 사이로 제어되며 기존 냉각시스템보다 냉각수 온도가 상향된 것을 확인할 수 있다. 냉각수 온도가 상향되면 엔진 오일 온도도 상향되어 마찰력이 감소되어 연비 향상에 도움이 된다^[5]. 냉각팬 회전 속도는 기존 냉각팬에 비해 전동식 냉각팬이 크게 감소하였음을 확인할 수 있다. 유체클러치 냉각팬의 경우 냉각수 온도가 낮은 영역에서도 고속 회전을 하였지만 전동식 냉각팬은 냉각수 온도와 연동되어 효율적으로 냉각하였다.

유체클러치 냉각팬의 동력전달 효율은 100%, CNG 엔진효율은 40%, 전동냉각팬 모터 효율은 95%, 교류발전기 발전 효율은 60%로 가정하였다^[6]. 실험구간에서 유체클러치 냉각팬의 최대 회전속도는 약 3,400 RPM, 평균회전 속도는 약 860 RPM 이며 냉각수 온도는 평균 87도였다. 전동식 냉각팬의 최대 회전속도는 1,400 RPM, 평균회전 속도는 약 550 RPM 이며 냉각수 온도는 평균 93도였다. 따라서 전동식 냉각팬을 적용한 결과 최대 회전속도는 2,000 RPM 감소하였으며, 평균회전속도도 540 RPM이 줄어들었다.

변화된 냉각팬 회전속도에 따른 에너지 소모량 변화율을 도출하기 위해서는 냉각팬 회전속도에 따른 소모 동력을 알아야한다. 실차에서 냉각팬 소모동력을 바로 측정하기 어렵기 때문에 단품실험

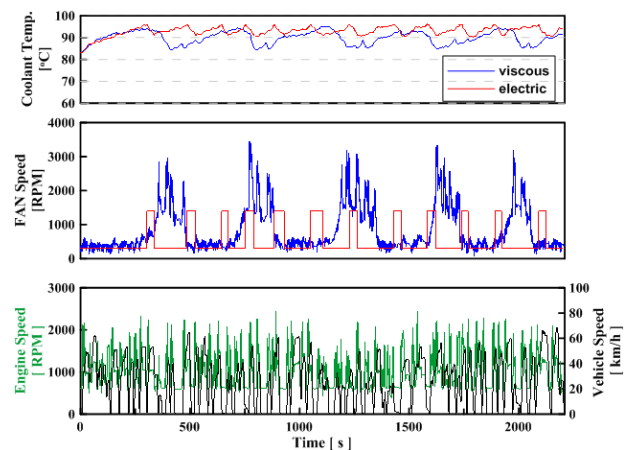


Fig. 3 Comparison of coolant temperature and fan speed between viscous clutch fan and electric fan

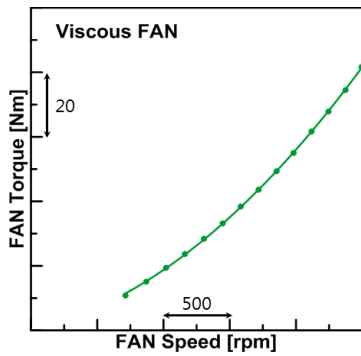


Fig. 4 Power consumption of cooling fan according to fan speed

을 통해 냉각팬 회전속도에 따른 소모동력을 Fig. 4와 같이 도출하였다. 회전속도가 증가함에 따라 2차 다항식의 형태로 소모동력이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 회전속도의 감소에 의해 에너지 소모량이 크게 줄어든다는 것을 의미한다. 이와 같이 구한 냉각팬 구동 토크를 이용하여 소모된 에너지는 식 (2)를 통해 도출하였다⁷⁾.

$$Fuel(g) = \frac{P_{fan} \cdot t_{fan}}{\eta_{th} \cdot Q_{LHV}} \quad (2)$$

- P_{fan} : Power consumption of fan, J/s
- t_{fan} : Operating time of fan, sec
- η_{th} : Engine thermal efficiency
- Q_{LHV} : Low heating value of fuel, J/g

위 단품 실험 결과를 이용하여 냉각팬의 에너지 소모량을 도출하였다. 유체클러치 냉각팬의 에너지 소모량은 128 g으로 전체 에너지 소모량의 6%를 차지하였고, 전동식 냉각팬의 에너지 소모량은 80 g으로 전체 에너지 소모량의 3.8%를 차지하였다. 따라서 전동식 냉각팬을 적용한 결과 에너지 소모량은 48 g 감소하였고 이로 인해 2.2% 연비개선 효과를 도출하였다.

3.2 발전제어 적용 시 연비 효과 확인

발전제어는 승용차에서 활발히 개발되고 있는 기술 중 하나로 교류발전기의 발전 전압을 제어하여 감속 시 발전량을 높이고 가속 시 발전량을 줄여 효과적으로 전력을 생산하는 기술이다^{8,9)}. 연료 소모가 많은 가속 중 발전에 의한 에너지 소모량을 줄이고, 연료 소모가 작거나 Fuel-cut이 되어 연료를 소모하지 않는 감속 중 발전하기 때문에 연비 개선 효과가 있어 이미 다수의 양산 차종에 적용되어 있다. 버스에 전동식 냉각팬을 적용할 경우 전력 소모가 크게 증가하므로 발전제어를 적용하면 연비개선 효과를 더욱 높일 수 있다.

발전제어가 적용되기 위해서 에너지 저장 공간인 배터리의 용량이 중요한 요인 중 하나이다. 방전을 고려하여 안정적인 전력 공급을 위해서 배터리에 일정량 이상의 전력이 보존되어야 되기 때문이다¹⁰⁾. 실험 차량의 배터리 제원은 12 V, 200 Ah로 2개의 배터리가 직렬로 연결되어 24 V로 작동되며 약 9.6 kWh 용량을 가진다. 이 용량은 발전제어를 적용하기에 충분한 용량으로 교류발전기와 달리 용량을 증가시키지 않고 현재 장착된제원 그대로 시뮬레이션 수행하였다. 배터리 SOC 제어범위는 80~90%로 90%가 되면 발전량을 0으로 하여 배터리로만 전력을 소비하고, 80%가 되면 교류발전기를 동작시켜 충전을 하며 전력을 소비하였다. 배터리 충/방전 효율은 각각 70%로 가정하였으며, 냉각팬 외에 사용되고 있는 기본 사용 전력량을 100 A로 가정하였다. 이는 실내 공조 장치가 작동될 경우 전력 소모량으로 전장 부하가 높은 경우로 가정하였다. 전동식 냉각팬의 최대 부하는 5 kW로 1,400 RPM에서 180 A를 소모한다. 충전 구간에서 교류발전기에서 발전되는 전력량은 360 A로 설정하였다.

본 연구에서 적용한 발전제어는 가속과 감속을 구별하여 충/방전을 반복하지 않고 SOC 수준에 따라 충/방전을 반복하는 로직을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5에 발전제어가 적용될 경우 배터리 SOC 변동과 냉각팬 작동영역을 나타내었다. SOC 90%로 충전된 후 운행되었다고 가정하였을 때 80%로 방전되기까지 약 900초에 시간이 소요되었고 90%로 재충전되기까지 약 800초의 시간이 소요되었다. 운행이 종료되기까지 남은 500초의 시간은 배터리에서 방전하였다. 발전제어가 적용되어 발전에 의해 소모되는 전기에너지는 약 56 g이 감소되었고 이를 모두 전동식 냉각팬에 사용하였다고 가정할 경우 냉각팬에 의한 에너지 소모량은 24 g이다. 유체클러치 냉각팬의 에너지 소모량이 128 g이므로 발전제어와 전동식 냉각팬을 동시에 적용한다면 연료를 104 g 절약할 수 있으며, 4.9%의 연비 개선 효과를 도출하였다.

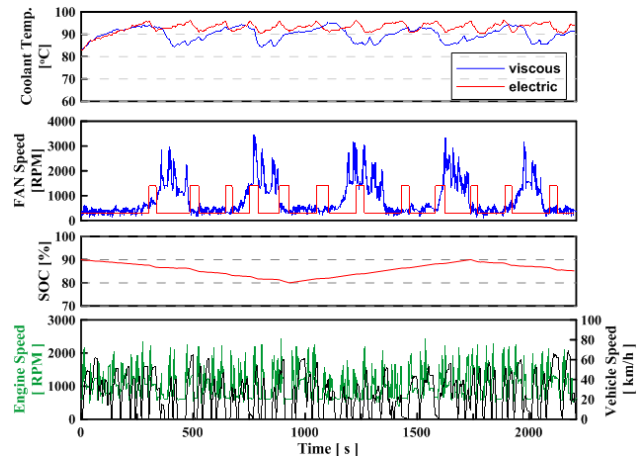


Fig. 5 SOC level of applying alternator management system

4. 결론

본 연구에서는 냉각수 온도 및 냉각팬 회전속도를 예측할 수 있는 시뮬레이션을 개발하고 이를 통해 발전제어가 적용된 시내버스에 전동식 냉각팬을 적용할 경우 감소하는 에너지양과 기대되는 연비 개선 효과를 분석하였다. 먼저 시내버스의 냉각수 온도 및 냉각팬 회전속도를 예측할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 구성하였다. 이를 이용하여 전동식 냉각팬을 적용할 경우 냉각수 온도가 평균 6도 증가하고 냉각팬 회전속도가 최대 2,000 RPM, 평균 540 RPM 감소하는 것을 확인하였다. 도출된 냉각팬 회전속도를 이용하여 에너지 소모량을 구해보면 유체클러치 냉각팬에 비해 전동식 냉각팬의 에너지 소모량이 약 2.2% 감소한 것을 확인하였다. 전동식 냉각팬은 전기 에너지 소모가 크기 때문에 발전제어를 적용할 경우 소모 에너지 감소량이 클 것으로 예상되어 시뮬레이션을 수행하였고, 전동식 냉각팬과 발전제어를 함께 적용한 결과 에너지 소모량이 4.9% 감소하였다.

References

[1] Lee, Y. G., Hong, Y. T., Park, J. I., Lee, J. H., 2008, The effect of fuel economy via types of cooling fan on 2L diesel vehicle, KSAESC, 20080422 564-568.
 [2] Won, J. P., Park, K. S., 2005, Thermal Flow Analysis of Vehicle

Engine Cooling System, KSAEIC FISITA00 H202.
 [3] Incropera F. P., DeWitt D. P., 2002, Heat and Mass Transfer, WILEY, USA, 659-676.
 [4] Oh C. S., Ryu T. Y., Lee E. H., Choi J. K., 2001, A Study of the Experiment and the Calculation Method on the Coolant Flow Rate of Engine and Vehicle Cooling System, SAE 99370185.
 [5] Kim B. S., Lim G. B., Lee B. O., Park J. I., Lee J. H., 2006, Effect of engine Friction on Vehicle Fuel Economy during Enignie warm-up Considering oil Temperature, KSAEFC 20061123 187-192.
 [6] Kang H. H., Kim K. B., Park J. I., Lee J. H., 2009 The Effect of Alternator Efficiency on Fuel Economy of FTP-75, KSAEFC 20091124 465-468.
 [7] Song H. B., 2002, Modeling and Experiments for the Breakdown of Fuel Consumption in Passenger Car, A Thesis for a Doctorate, Ajou University, Republic of Korea.
 [8] Gao Y., Chen L., Ehsani M., 1999, Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV, SAE 1999-01-2910.
 [9] Kim D. K., Lee J. Y., Choi M. S., Kim K. Y., Kim S. T., Lee S. P., 2012, A Development of Next Generation Alternator Management System, KSAEFC 20121121 584-589.
 [10] Zheng C. H., Park Y. I., Lim W. S., Cha S. W., 2012, A Study on Battery SOC Estimation by Regenerative Braking in Electric Vehicles, KSAE, 20:2 154-158.