

직렬형 하이브리드 버스에서 보조동력장치의 고효율 작동을 위한 제어 알고리즘

함윤영^{*1)} · 송승호²⁾ · 민병문³⁾ · 노태수³⁾ · 이재왕⁴⁾ · 이현동⁴⁾ · 김철수⁴⁾

우석대학교 자동차공학과^{*1)} · 전북대학교 전자정보공학부²⁾ · 전북대학교 기계항공시스템공학부³⁾ · 현대자동차⁴⁾

A Control Algorithm for Highly Efficient Operation of Auxiliary Power Unit in a Series Hybrid Electric Bus

Yunyoung Ham^{*1)} · Seungho Song²⁾ · Byungmun Min³⁾ · Taesu No³⁾

Jaewang Lee⁴⁾ · Hyeoundong Lee⁴⁾ · Chulsoo Kim⁴⁾

^{*1)}Department of Automotive Engineering, Woosuk University, Chonbuk 565-701, Korea

²⁾Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University, Chonbuk 561-756, Korea

³⁾Division of Mechanical and Aerospace System Engineering, Chonbuk National University, Chonbuk 561-756, Korea

⁴⁾Hyundai Motor Company, 772-1 Changduk-dong, Whasung-si, Gyeonggi-do 445-850, Korea

(Received 28 March 2003 / Accepted 11 July 2003)

Abstract : A control algorithm is developed for highly efficient operation of auxiliary power unit (APU) that consists of a diesel engine and a directly coupled induction generator in series hybrid electric Bus (SHEB). In a series hybrid configuration the APU supplies the electric power needed for maintaining the state of charge (SOC) of the battery unit in various conditions of vehicle operation. As the rotational speed of generator does not depend on the vehicle speed, an optimized operation of engine-generator unit based on the efficiency map of each component can be achieved. The output torque of diesel engine can be controlled by the amount of fuel injection, and the power converted from mechanical to electrical energy can be adjusted by generator control unit (GCU) using the decoupling vector control of torque and flux. As for the given reference of the generating power, the multiply of speed and torque, many combinations of operating speed and torque are possible. The algorithm decides the new operating point based on the engine efficiency map and generator characteristic curve. During the transition of operating points, the speed controller saturation is avoided using variable limit and filtering of generator torque reference. A test rig and SHEB consist of a 1.5L diesel engine and a 30kW induction generator are constructed by Hyundai Motor Company.

Key words : Diesel engine(디젤엔진), Series hybrid electric vehicle(SHEV:직렬형 하이브리드 전기자동차), Power efficiency(전력 효율), SHEV Control strategy(SHEV 제어 전략)

1. 서론

최근 자동차 기술은 지구환경 및 석유자원 고갈 등의 문제로 저공해, 고연비 차량 개발에 집중되고

있으며, 하이브리드 전기자동차, 연료전지 자동차, 전기자동차와 같이 기존의 내연기관을 대체할 수 있는 동력시스템 개발에 대한 관심이 커지고 있다. 특히, 하이브리드 전기자동차는 주행거리, 비용, 차량성능, 기술적 성숙도 등에서 한계를 보이고 있는

*To whom correspondence should be addressed.
songsh@moak.chonbuk.ac.kr

전기자동차와 연료전기자동차에 비해 보다 현실적인 대안으로서 주목받고 있다.^{1,2)}

하이브리드 전기자동차는 내연기관 및 모터를 동시에 탑재하여 구동하는 동력전달장치를 가지고 있으며, 구동방식에 따라 직렬형과 병렬형으로 구분된다. 병렬형은 내연기관과 모터로부터 나오는 동력이 차량의 요구동력을 만족하도록 병렬로 조합되며 직렬형은 단지 모터만이 차량을 구동시키며, 내연기관은 연료를 전기동력으로 변환시키는 역할을 한다.

서울과 같은 대도시에서는 저공해, 고연비의 대중교통수단이 필요한데, 그 목적을 위해 현대자동차에서 1.5L 디젤 엔진과 유도 전동기, 발전기, 납산 배터리 등으로 구성되는 직렬형 하이브리드 버스 차량을 개발하였다. 하이브리드 버스를 제어하는데 있어서 가장 중요한 것은 배터리의 충전상태(SOC)를 효율적으로 유지시키고, 내연기관과 발전기로 구성되는 보조동력장치(APU)가 차량 구동에 필요한 요구동력을 효율적으로 발생시킬 수 있도록 하는 것이다.⁹⁾

본 연구에서는 엔진 특성 데이터 분석 결과를 토대로 현대자동차의 직렬형 하이브리드 버스에 적용되는 동력시스템에 대하여, 디젤 엔진은 토크제어 모드로, 발전기는 속도제어 모드로 작동되는 보조동력장치의 시스템 제어 전략을 수립하고, 운전사 이클에 따른 시뮬레이션을 수행하여 제어전략의 타당성을 검증하였다.

2. 현대자동차 직렬형 하이브리드 버스

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 현대자동차 직렬형 하이브리드 버스는 전기동력부, 전기에너지 저장장치, 전기에너지 발전장치의 세 가지 주요 부분으로 구성된다. 전기동력부는 120 kW의 유도 전동기와 제어기(MCU), 1단 감속기어로 구성된다. 전기에너지 저장장치로는 납산(lead-acid) 배터리 팩이 사용되며 전기동력부와 전기발전부 사이의 에너지 버퍼의 역할을 한다. Fig. 1에서 보조동력장치(APU)로 표기된 전기발전장치는 1.5L 커먼레일 연료분사식(common rail fuel injection) 디젤엔진과 엔진제어장치(ECU), 30 kW의 유도 발전기와 제어기(GCU)로

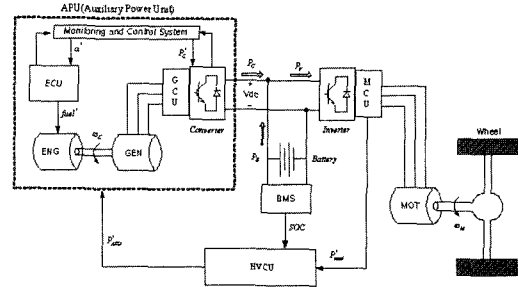


Fig. 1 System structure of the Hyundai series hybrid electric bus

이루어져 있다. 유도 발전기의 회전자는 엔진토크의 리플을 완화시키는 댐퍼 플레이트를 통해 엔진의 크랭크축과 연결된다.

배터리의 충전상태(SOC), 그리고 가속 페달량, 브레이크 페달량, 변속레버 위치 등 운전자의 의지와 관련하여, 하이브리드 버스의 상위제어기인 차량제어기(HVCU)는 APU 제어기와 MCU에 지령을 발생시킨다. MCU로의 지령은 차량의 가속이나 감속을 결정하기 위해 전동기로 보내지는 토크 지령(T_M)이며, APU 제어기로의 지령은 차량의 현주행 조건에서 배터리의 충전 상태를 유지시키도록 전동기와 배터리에 보내지는 전력 지령(P_{APU})이다. APU가 차량제어기(HVCU)로부터 요구되는 전력을 발생시키기 위해서는 엔진의 속도와 토크가 결정되어야 하는데, APU 제어기는 ECU와 GCU로 각각 토크 지령값과 속도 지령값을 만들어낸다. 주어진 속도조건에서 엔진토크는 연료량에 의해 결정되고 조절될 수 있다. 또한 엔진속도는 발전기와 GCU의 속도제어에 의해 결정되고 조절된다. GCU에 의해 일정속도로 제어되는 발전기는 자동적으로 엔진토크와 같은 크기의 (-)토크를 발생하게 된다. 따라서, APU에 의해 정해진 토크 및 속도를 가지고 차량제어기(HVCU)로부터 요구되는 전력과 동일한 전력을 발생시킬 수 있다.

3. APU 제어 전략

직렬형 하이브리드 버스(SHEB)를 제어하는데 있어 가장 중요한 것들은 동력장치제어, 배터리 충전상태(SOC) 관리, APU 제어인데, 본 연구에서는 전동기에 요구되는 전력을 공급하는 APU 제어에 대

해 중점적으로 다루었다.

APU 제어 전략의 내용은 다음과 같다.

1) 배터리 충전상태(SOC), 차량속도, 브레이크 및 가속페달량과 같은 운전자 의지 등을 고려하여 APU 제어기가 전력 지령값을 발생

2) 요구되는 전기에너지를 만들기 위해 GCU에 속도 지령값, ECU에 토크 지령값 발생

3) 과도상태에서 전력 지령값의 이동(속도, 토크 폭선 고려)

Fig. 2는 SHEB 제어 목적을 달성하기 위한 제어 시스템의 개략도이다. 전동기 제어기(MCU)는 가, 감속등 운전자의 의지와 관련하여 차량제어기(HVCU)로 보내질 모터 구동토크(T_M)와 회전속도(ω_M) 값을 생성하면서 동력 기준값, P_{veh}^* 를 요구한다. 차량제어기(HVCU)는 또한 배터리 충전상태(SOC)에 대한 정보를 받으며 APU 제어기로 하여금 전력 지령값 P_{APU}^* 을 발생하도록 요구한다.

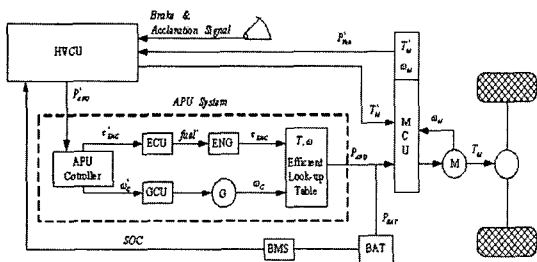


Fig. 2 Proposed control system structure for SHEB

3.1 전력 지령값 발생

전력 지령값(P_{APU}^*)의 발생은 APU 제어기의 주요 역할 중 하나인데, Fig. 3에서 보는 바와 같이 속도-토크 평면상의 등전력곡선들 중에서 어느 값을 선정하느냐 이다. 본 연구에서는 차량제어기(HVCU)의 요구 전력을 Table 1에 표시된 제어 전략에 따라 결정한다. 즉, 배터리 충전상태(SOC)가 하한값, SOC_{low_limit} 보다 작은 경우 APU는 최대 전력값, P_{APU_max} 을 지령하고, 반대로 상한값, SOC_{high_limit} 보다 클 경우 최소 전력값, P_{APU_min} 을 지령한다. 배터리 충전상태가 하한값과 상한값 사이에 있을 경우는 SOC와 차량 요구 동력(P_{veh}^*)을 동시에 고려하여 P_{APU}^* 를 발생한다.

3.2 속도 및 토크 지령값 발생

APU 시스템의 최적 작동은 엔진과 발전기의 속도와 토크를 조절함으로써 가능하다. 전력 지령값이 결정된 후 APU 제어기는 발전기에게 속도 지령값을, 엔진에는 토크 지령값을 발생한다. 그런데 동일한 전력을 발생하더라도 속도와 토크의 조합에 따라 배출가스와 연료 소비율에 차이가 있기 때문에 최적의 속도, 토크를 결정하는 것이 매우 중요하다. 디젤엔진에서 발생하는 토크는 연료 분사량에 의해 조절된다. 토크와 연료 분사량 사이의 관계는 동력계를 이용한 실험으로부터 구할 수 있으며, Fig. 5와 같이 맵(map)의 형태로 제어기의 메모리에 저장할 수 있다. 또한 이 데이터를 토대로 토크 지령

Table 1 Demanded power from MCU and HVCU

SOC	Demanded power from MCU	Demanded power from HVCU
$SOC < SOC_{low_limit}$	-	$P_{APU}^* = P_{APU_max}$
$SOC_{low_limit} < SOC < SOC_{high_limit}$	$P_{veh}^* < P_{opt_low}$	$P_{APU}^* = 10kW$
	$P_{opt_low} < P_{veh}^* < P_{opt_high}$	$P_{APU}^* = 15kW$
	$P_{veh}^* > P_{opt_high}$	$P_{APU}^* = 20kW$
$SOC > SOC_{high_limit}$	-	$P_{APU}^* = P_{APU_min}$

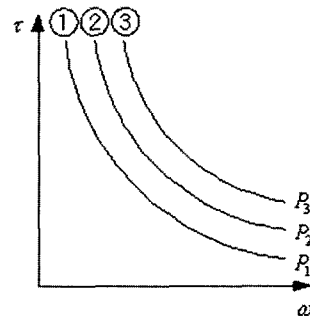


Fig. 3 Power command generation

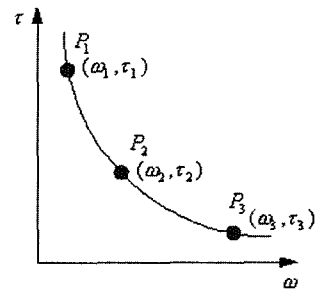


Fig. 4 Speed and torque command generation

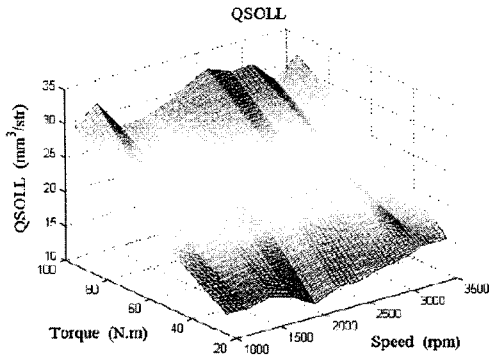


Fig. 5 QSOLL referring to engine speed and torque (QSOLL : fuel injection value per a stroke)

값을 연료분사량 지령값으로 변환시킬 수 있다.

3.3 과도상태에서 전력 지령값 이동

본 연구에서, 지령값 이동은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 APU 시스템의 작동점이 P_1 에서 P_2 로 이동할 때 속도와 토크의 변화 궤적으로 정의된다. 일반적으로 작동점이 이동하여 정상상태로 안정화되는데는 엔진의 동적 특성의 제약으로 인해 수 초 이상이 걸린다. 또한 SHEV의 운전상태가 부하조건에 따라 자주 바뀌기 때문에 APU 시스템이 충분한 시간동안 정상상태로 머물기가 어렵다. 따라서 과도상태에서의 시스템 효율과 배출가스 특성에 대한 고려가 있어야 한다. APU 시스템의 효율과 배출가스 특성은 차량주행테스트에 의한 시행착오방식을 통해 속도와 토크의 최적 조합의 선정에 달려있다.

본 연구에서 과도상태에서의 속도와 토크 지령값은 아래와 같이 선정된다.

- 1) 기계적 충격이 적도록 하면서 토크 지령값을 선형적으로 증가, 감소시킴
- 2) 속도의 오버슈트나 언더슈트를 억제하면서 속

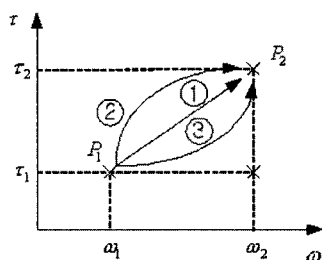


Fig. 6 Command tracking in transient

도 지령값을 선형적으로 증가, 감소시킴

3.4 발전기의 속도 제어

발전기의 제원은 Table 2와 같다. 발전기는 수납 공간의 크기와 냉각효율을 고려하여 수냉식을 사용하였으며 GCU 인버터의 고속 스위칭으로 인해 di/dt와 dv/dt에 대비하여 권선간 및 권선-프레임간 절연을 강화시키도록 하였다.

Table 2 Specification of induction generator

Power[kW]	30 / 50	Rated / max.
Torque [Nm]	160	Max.
Speed [rpm]	3,000 / 6,000	Base / Max.
Pole numbers	6	-
Rated voltage [V]	184	Line-to-line
Rated current [A]	120	-

Fig. 7은 유도 발전기의 속도 제어에 대한 블록 다이어그램이다. 기준 속도와 실제 속도사이의 오차는 비례적분(PI) 속도 제어기로 입력된다. PI 속도 제어기의 출력은 발전기의 토크를 생성하는 q-축 기준 전류값으로 사용된다. PI 방식의 전류 제어기는 동적 응답성이 속도 제어기보다 빠르기 때문에 Fig. 7에서와 같이 저역 통과 필터로써 간주될 수 있다.⁸⁾

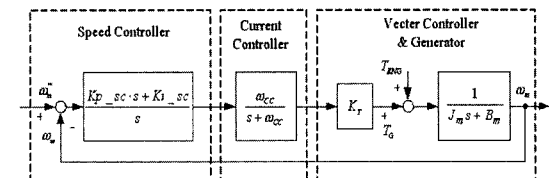


Fig. 7 PI type speed controller of the proposed control algorithm

4. 제안된 제어전략의 시뮬레이션

현재 배터리의 SOC와 차량의 요구 전력에 따라 엔진-발전기로부터 요구되는 보조 전력 요구량을 발전기의 전력 효율을 고려하여 Table 1과 같이 10, 15, 20 kW로 세분하는 SHEV 제어 전략과 0 kW와 20 kW로 on/off를 반복하면서 전력을 공급하도록 하는 써모스태트(thermo-stat) 제어 전략으로 나누어 차량 운행에 따른 전력 공급, 배터리의 SOC 상태, 엔진의 배출가스와 발전기의 출력 특성에 대해 시

플레이션을 수행하고 결과를 비교하였다. 결정된 전력요구량에 따라 토크지령과 속도지령을 결정함에 있어서는 Fig. 8에 도시한 발전기 전력효율을 고려하여 효율이 가장 양호한 영역에서 엔진이 작동하도록 설정하였다. 발전기의 전력효율 데이터로부터 효율이 가장 양호한 영역은 엔진속도가 2200~2700 rpm 범위에 해당하지만 본 연구에서 제한한 제어전략에서는 발전기 속도를 2400 rpm으로 일정하게 유지하고 엔진 토크를 각각 40, 60, 80 N·m로 변화시켜 보조전력요구량에 해당하는 전력을 생성하도록 구성하였다.

FTP-75 모드중 초기 600 sec동안에 대해 시물레이션을 수행하였는데, Fig. 9는 시간에 따른 차량 속도와 차량의 요구전력, P_{veh}^* 을 나타낸다. 그리고 Fig. 10은 엔진-발전기로부터 요구되는 보조전력요구량,

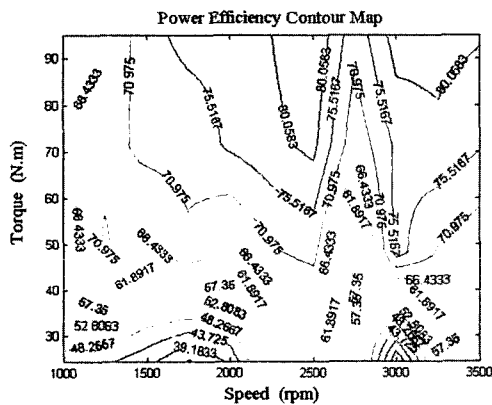


Fig. 8 Power efficiency contour map according to torque and speed

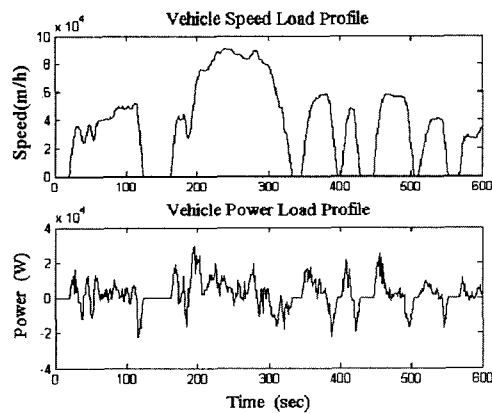


Fig. 9 Load profiles for the FTP driving cycle for simulation

P_{APU}^* 와 배터리 관리 시스템(BMS)에서 계산된 배터리의 요구전력을 나타낸다. 결과에서 보는바와 같이 차량이 가속을 자주 하게되고 이에 따른 차량의 요구전력 또한 급격하게 변함에 따라 써모스태트 제어전략시 보조전력부에 요구되는 전력요구량의 변화가 SHEV 제어전략에 의한 경우보다 급격하게 변하는 것을 알 수 있다. 두 제어 전략에 의한 운전 모두 0.005 kW의 전력 오차 범위내에서 차량에 요구되는 전력을 안정적으로 공급한다.

Fig. 11에서는 SHEV 제어전략과 써모스태트 제어전략 사이의 연료분사량, 배터리 충전상태(SOC) 변화, 배출가스 특성에 대해 FTP-75 모드 조건에서 시물레이션을 통해 비교한 결과이다. SHEV 제어전략의 결과는 써모스태트 결과를 기준으로 무차원화하였다. 결과에서 보는 바와 같이 제안된 SHEV 제어전략이 연료소비율과 질소산화물(NOx)에서 써모스태트 전략보다 우수함을 보이나 HC, CO 배출

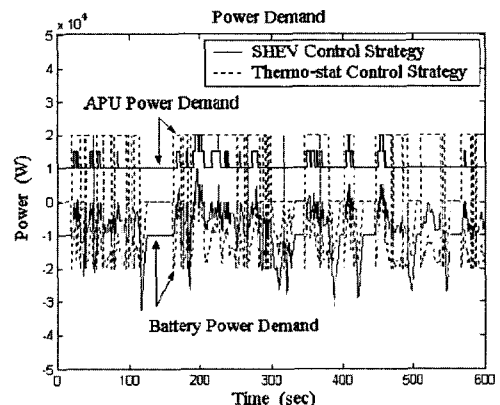


Fig. 10 Simulation result of APU and battery power demands

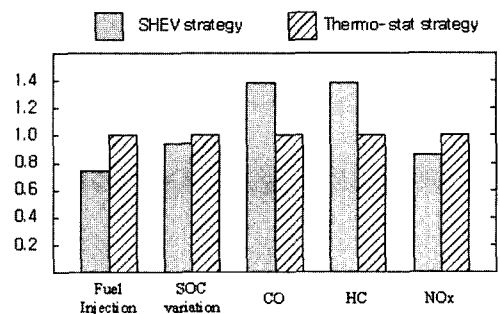


Fig. 11 Comparisons between proposed SHEV and Thermo-stat strategy

가스에서는 효과가 낮음을 알 수 있다.

SHEV 제어전략에 의해 차량을 운행할 경우 차량의 요구전력에 따라 보조전력부에서 공급해야 할 전력량을 세분화하고 각 운전 상황에 따라 토크 뿐만 아니라 엔진의 적정 운전속도까지 고려할 경우 연비향상, 배출가스 저감 등 차량의 운전 목표를 보다 효과적으로 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

현대의 직렬형 하이브리드 버스에 적용되는 동력 시스템에 대하여, 보조동력장치 제어기의 전력 지령값 발생, ECU 및 GCU의 토크 및 속도 지령값 발생, 그리고 과도상태에서의 지령값 이동, 벡터제어 유도발전기의 속도제어 등 제어 전략을 조사, 분석하였다. 상기 전략을 토대로 한 APU 제어 알고리즘을 FTP-75 주행모드를 사용하여 모델링과 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 배터리의 SOC와 차량의 요구 전력에 따라 엔진-발전기로부터 요구되는 보조 전력 요구량을 발전기의 전력 효율을 고려하여 세분하는 SHEV 제어 전략을 개발하였으며 on/off 방식인 씨모스태트 제어 전략과의 비교를 통해 연료 소비율 및 질소산화물 배출 저감에 효과가 있음을 확인하였다.

References

- 1) S. T. Cho, Fuel Economy Optimization of Hybrid Electric Vehicle with Single Performance Index, Ph. D. Dissertation, Seoul National Univ., 2002.
- 2) B. M. Ehsani, P. Kamath, "A Matlab-Based Modeling and Simulation Package for Electric and Hybrid Electric Vehicle Design," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.48, No.6, pp. 1770-1778, 1999.
- 3) P. Waeltermann, "Modeling and Control of the Longitudinal and Lateral Dynamics of a Series Hybrid Vehicle," Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications, pp.191-198, 1996.
- 4) N. Jalil, N. A. Kheir, M. Salman, "A Rule-Based Energy Management Strategy for a Series Hybrid Vehicle," Proceedings of the 1997 American Control Conference, pp.689-693, 1997.
- 5) M. Hayashida, K. Narusawa, "Optimization of Performance and Energy Consumption on Series Hybrid Electric Power System," International Congress and Exposition Detroit, SAE 1999-01-0922, 1999.
- 6) S.-H. Song, S.-J. Jeong, Y.-Y. Ham, "Modeling and Control of Coupled Engine and Generator System," EVS 19 Busan, 2002.
- 7) J.-W. Lee, H.-D. Lee, S.-H. Song, "A Control Algorithm for Highly Efficient Operation of Auxiliary Power Unit in Series Hybrid Electric Bus," EVS19 Busan, 2002.
- 8) S. K. Sul, Electric Machine Control Theory, Brain Korea, pp.105-108, 2002.
- 9) S. T. Cho, S. I. Jeon, J. M. Lee, "The Recent Studies for Maximizing Fuel Economy on Hybrid Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.23, No.5, pp.22-28, 2001.