PCS 최적설계를 위한 고분자 전해질 연료전지의 동특성 모델링

論 文
57-9-12

Dynamics Modeling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) for Optimal Design of Power Conditioning System (PCS)

金 鍾 秀* · 崔 奎 英* · 康 鉉 受* · 李 秉 國†
(Jong-Soo Kim · Gyu-Yeong Choe · Hyun-Soo Kang · Byoung-Kuk Lee)

Abstract - In this paper, dynamics modeling of a PEMFC is performed by electro-chemical equations. The developed PEMFC simulation model is implemented using MATLAB Simulink in order to design an optimal PCS for fuel cell systems. In addition, by use of the developed model as an input source of PCS, the validity of the proposed dynamic characteristic model of the PEMFC is verified by various simulation and experimental results.

Key Words : PEM Fuel Cell, Fuel Cell Dynamics, Modeling and Simulation, PCS for Fuel Cell, Optimal Design

1. 서 론

화석연료 매장량 제한과 연소 시 발생되는 온실가스로 인한 지구 온난화 문제로 인해 무한 청청에너지원인 신재생에너지원의 역할이 급격히 증가되고 있다. 이 중 연료전지는 타 신재생 에너지원에 비해 발전효율이 높고 상시발전이 가능한 장점 때문에 분산전원용뿐 아니라 수송용, 휴대용 등 다양한 분야에서 중요한 역할을 담당할 것으로 기대된다 [1]. 연료전지는 전기화학반응으로 인한 발전 특성 때문에 고유의 비선형 직류 전압이 출력되므로 이를 사용자가 원하는 다양한 형태의 전력으로 변환 및 제어하기 위한 PCS의 사용은 필수적이다. PCS의 효율과 신뢰성은 전체 발전시스템의 효율과 신뢰성에 큰 영향을 미치므로 PCS는 반드시 고효율, 고성능, 고신뢰성을 가질 수 있도록 설계되고 운전되어야 한다 [2].

이런 조건을 만족시키는 PCS 최적 설계를 위해서는 입력전원의 정확한 특성 이해가 필수적이다. 이를 위해 현재까지 다양한 방법으로 연료전지 스택의 비선형 특성을 나타내는 모델링이 수행되었다. 이 중 BJT, 다이오드, 인덕터 및 커패시터를 이용하여 Pspice를 기반으로 한 전기적 모델링이 수행되었다 [3]. 이 모델은 구성은 간단하지만 연료전지 스택의 변화에 능동적으로 대처하기가 어려운 단점을 갖는다. 다른 접근 방법으로 연료전지 시스템의 주파수별 임피던스의 변화를 관찰하여 시스템을 모델링하는 임피던스 분광법 (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)에 의한 임피던스 모델이 제안되었다 [4],[5]. 이 모델은 연료전지의 특성을 잘 나타내주며, PCS와 연계하여 시뮬레이션하기 좋은 환경을 제공해준다. 그러나 주파수별 임피던스의 정밀한 측정을 위한 고가의 장비가 필요하며 연료전지 모델의 변화에 따라 능동적으로 대처하기 어려운 단점이 있다. 그 외 연료전지 스택의 특성을 가장 잘 반영할 수 있는 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics: CFD)에 의한 모델링이 수행되었다 [6]. 연료전지의 정특성뿐 아니라 동특성까지 잘 반영하고 있지만 모델링의 과정이 매우 전문적인 전기화학 및 기계공학적 지식을 요구하고, PCS의 최적설계를 위한 시뮬레이션 전원모델로 사용할 수 없다는 문제점이 있다. 이상에서와 같이 연료전지 스택에 대한 다양한 모델링이 수행되었지만, PCS 최적설계를 위해 연료전지 모델과 PCS의 연계 시뮬레이션이 가능한 비선형 모델은 매우 부족하다. 또한 다양한 종류 및 용량의 연료전지에 대해 능동적으로 대처할 수 있는 모델도 미미한 현실이다. 때문에 현재까지 연료전지용 PCS의 설계 및 시뮬레이션 시 대부분 이상적인 직류 전압원을 사용하고 있으며, 이는 연료전지에 최적화된 PCS를 설계가 어렵다는 것을 의미한다.

따라서 본 논문에서는 PCS 설계 시 연료전지 특성을 고려할 수 있는 시뮬레이션 플랫폼을 제공하기 위해 복잡하고 산재되어 있는 전기화학 방정식을 체계적이고 단계적으로 정리하여 연료전지의 조건 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 연료전지 스택 동특성 모델링을 수행하였다. 또한 제안된 모델을 PCS와 연동하여 시뮬레이션 하기 쉽도록 MATLAB Simulink로 구현하였고, 이를 Simulink Toolbox 내의 하나의 함수블록처럼 사용할 수 있도록 구성하였다. 구성된 모델을 PCS의 입력전원으로 사용하여 PCS 최적설계를 위한 연료전지의 동특성 모델링의 필요성을 입증하였다. 이를 위해 구성된 PCS는 PSIM으로 구현하였으며, 제안된 연료전지 모델을 PCS와 연계하여 시뮬레이션하기 위하여 *Simcoupler* 블록을 사용하여 연계 시뮬레이션을 수행하였다. 개발된 연료전지 모델의 타당성은 다양한 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다.

* 正 會 員 : 成均館大學校 情報通信工學部 博士課程
† 교신저자, 正會員 : 成均館大學校 情報通信工學部 助教授 · 工博
E-mail : bkleeskku@skku.edu
接受日字 : 2008年 3月 19日
最終完了 : 2008年 8月 25日

2. 연료전지 동특성 모델링의 필요성

연료전지용 PCS의 최적설계를 위해서 입력전압의 변동범위, 제어기의 루프이득, 부하특성 및 변동률 등은 중요한 변수이다. 일반적인 dc-dc 컨버터는 입력전압 변동범위를 고려하여 하드웨어 및 제어기를 설계하며, 연료전지용 dc-dc 컨버터도 사양에 제시된 전압변동범위를 고려하여 설계한다. 그러나 일반적인 연료전지의 출력전압 변동범위는 최고전압 대비 최저전압은 약 50% 정도로 변동 폭이 매우 크며 부하 변화에 따라 변화되는 비선형 특성을 갖는다. 또한 부하 급변 시 전압의 급격한 강하가 발생되고 천천히 회복되는 동특성을 갖는다. 때문에 넓은 변동 범위에서도 성능을 만족시킬 수 있도록 안정적인 설계가 필요하며, 제어기 설계 측면에서 연료전지 동특성 모델링의 필요성을 고찰하면 다음과 같다.

비선형 전원 입력 시 입력전압 변동에 따른 시스템의 안정도를 평가하기 위하여 일반적인 부스트 컨버터를 선택하여 2pole-2zero 오차 증폭기로 출력 전압을 제어한다. 그림 1은 부스트 컨버터와 적용된 제어기의 구성도를 나타내고 식 (1)은 부스트 컨버터의 전달함수, 식 (2)는 오차 증폭기의 전달함수를 나타낸다 [7].

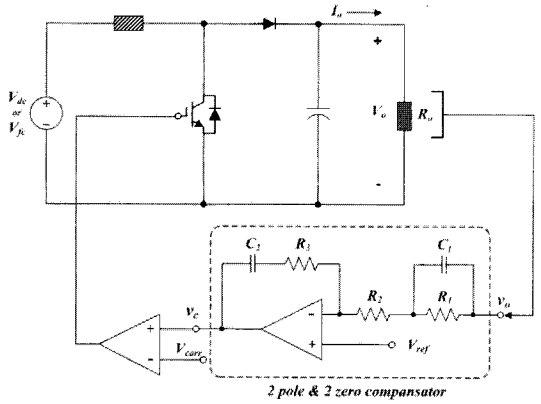


그림 1 부스트 컨버터 및 제어기 구성도

Fig. 1 Block diagram of boost converter and controller

$$G_d(s)=\frac{G_{d0}\omega_n^2\left(1-\frac{s}{\omega_e}\right)\left(1+\frac{s}{\omega_c}\right)}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2} \tag{1}$$

여기서, $\xi=\frac{1}{2\omega_n}\pi\left(\frac{1}{CR}+\frac{r_c}{LD'}\right)$ 이다.

$$\frac{v_c}{v_o}=\frac{(1+sC_1R_1)(1+sC_2R_3)}{sC_2R_1(1+sC_1R_2)} \tag{2}$$

구성된 컨버터의 전체 루프이득은 식 (3)과 같다.

$$T(s)=G_d(s)\cdot A(s)\cdot\frac{1}{V_m} \tag{3}$$

여기서, $G_d(s)$는 제어전달함수, $A(s)$는 오차증폭기 이득, $1/V_m$은 비교기 이득이다.

그림 2는 모든 조건이 동일한 상태에서 입력전압의 크기에 따른 부스트 컨버터의 출력 응답 성능을 나타낸다. 샘플링 이론에 근거하여 0dB를 통과하는 차단파수는 $f_c<f_s/2$와 $f_c<f_s/2\pi D$를 만족하는 값으로, 이득의 기울기는 -20dB/dec로, 0dB의 이득에서 위상 여유는 -90°에 근접하게 설정하였다. 이상적인 정전압원이 입력될 경우, 0dB를 통과하는 이득의 기울기는 -20dB/dec이며 이때의 위상 여유는 -90°에 근접하여 시스템이 안정적인 것을 알 수 있다. 그러나 입력전압이 부하 변화에 따라 달라지며 큰 전압강하를 갖는 동특성을 나타낼 경우 부스트 컨버터 응답의 안정도는 변화되고, 특히 입력전압이 30V 이하인 경우 위상 여유는 -180°를 넘어서게 되며 시스템은 불안정한 상태가 된다. 따라서 비선형 전원이 입력될 경우 동일한 제어 성능을 확보하기 위해서는 추가적인 보상회로 또는 최적화 된 게인 설정이 필요하며, 이에 대한 시뮬레이션을 위해서는 정확한 연료전지 동특성의 모델링을 통한 시뮬레이션 모델이 반드시 필요하다.

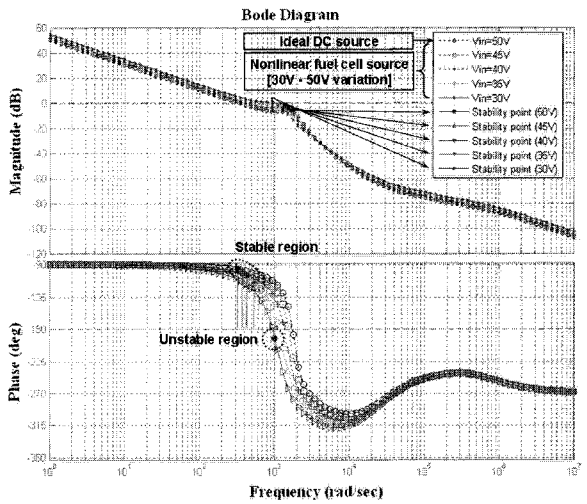


그림 2 입력전압 변화에 따른 출력전압응답의 보드선도

Fig. 2 Bode plot of output voltage response according to input voltage variation

3. PEMFC의 물리적 구조와 동작원리

3.1 물리적 구조

PEMFC의 수학적 모델링을 보다 쉽게 이해하기 위해서는 PEMFC의 기본구조와 동작원리를 이해하는 것이 필요하다. 그림 3은 일반적인 PEMFC 단위 셀의 구조를 보여준다. 중앙에 고분자 전해질 막 (Membrane) 이 있고, 전해질 막의 양쪽에 연료극 (Anode)과 공기극 (Cathode)의 두 전극 (Electrode)이 위치한다. 이것은 일반적으로 일체형으로 제작되고 막-전극 접합체 (Membrane Electrode Assembly, MEA)라고 한다. 전해질로는 대부분 나피온 (Nafion)이 사용되고, 이것은 수소이온에 대해서만 전도도를 가진다. 전극

은 얇은 지지체와 탄소천이나 탄소종이 위에 촉매를 뿌려서 만들어 지며, 반응면적을 최대화하기 위해서 전극, 촉매, 탄소의 삼상계면이 크게 형성하도록 제작된다. 전극 양쪽으로는 연료의 공급을 고르게 분포시키기 위한 가스 확산층 (Gas Diffusion Layer, GDL)이 존재한다. 연료 밀봉을 위해 개스킷 (Gasket)이 삽입되며, 일반적으로 고무를 사용한다. 마지막으로 반응물을 공급하기 위한 채널, 생성물인 물의 제거를 위한 통로 그리고 생성된 전자를 외부로 이동할 수 있게 해주는 집전체가 필요한데 이를 분리판 (Bipolar Plate)이 담당한다. 분리판 내부의 유로는 실제 반응물이 이동하고 생성물이 제거되는 곳으로 이의 형상 설계는 연료전지 성능에 매우 중요한 역할을 한다 [8].

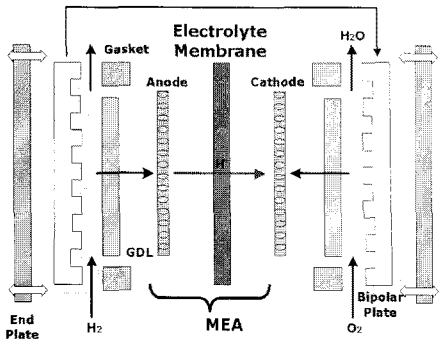


그림 3 PEMFC의 물리적 구조
Fig. 3 Physical structure of PEMFC

3.2 동작원리

그림 4는 PEMFC의 동작 원리를 보여준다. 연료는 가습된 상태로 매니폴드 (Manifold)를 지나 분리판의 채널로 공급된다. 가습을 하는 이유는, 수소이온이 수화된 H_3O^+ 의 형태로 전해질 막을 통과할 때 이온전도도가 높기 때문이다.

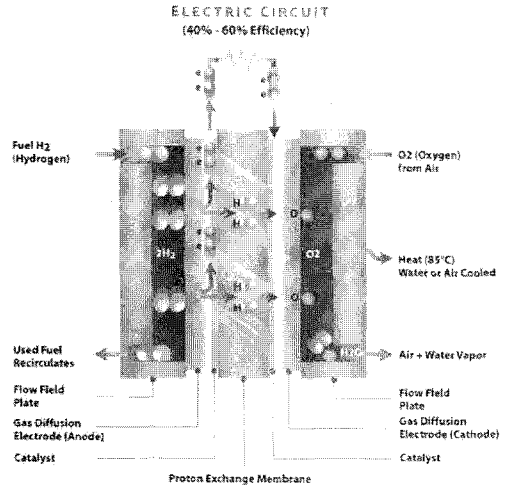


그림 4 PEMFC의 동작원리 [10]
Fig. 4 Operating principle of PEMFC [10]

연료극에서의 일반적인 반응은 산화반응이다. 유입된 수소는 수소이온 (H+)과 전자 (e-)로 분리되며 이온은 이온전도성을 가진 전해질 막을 통해서 산소극으로 이동하고, 전자는 전해질 막을 통과하지 못하고 집전판을 통해 외부 회로로 이동한다. 이와 같은 메커니즘으로 인해 전류가 발생된다. 산소극에서의 일반적인 반응은 환원반응이다. 환원제로 공급되는 산소와 수소가 이온화 되어 전해질 막을 투과한 수소이온 그리고 외부 회로를 통해 이동된 전자의 환원반응으로 반응물인 물과 열이 발생된다. 각 극에서 발생되는 화학 반응식은 (4)-(6)과 같다 [9].

$$Anode \quad : H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \quad (ionization) \tag{4}$$

$$Cathode : \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \quad (reduction) \tag{5}$$

$$Overall \quad : H_2 + \frac{1}{2}O_2 \Rightarrow H_2O + Heat \tag{6}$$

4. PEMFC의 동특성 모델링 [8],[9]

4.1 네른스트 모델

연료전지 출력을 결정하는 화학에너지는 깁스 자유에너지로 설명된다. 반응물의 반응이 가역반응이라고 할 때 이론적 최대 전압 (Open circuit voltage)은 1.229V 이다. 그러나 실제 연료전지 출력은 이론적 최대 전압보다 낮으며 이를 결정하는 요소가 고려되어야 한다. 네른스트 모델은 비표준 상태에서 이론적인 전극 전위를 계산할 수 있는 식으며 연료전지 내부의 전기화학 반응으로 유도할 수 있다. 식 (7)은 네른스트 방정식을 나타낸다.

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F}\ln\frac{P_{H_2}P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \tag{7}$$

여기서, E^0는 평형전극전위, R은 가스상수 (8.3144 J/mol K), T는 절대온도 (K), F는 페러데이 상수 (96,485 C/mol), P는 분압을 나타낸다. 비표준 상태의 이론적 전극 전위는 연료, 산소, 물의 분압과 온도에 의해 결정된다.

4.2 분극현상 및 연료손실

실제 연료전지의 반응은 비가역 손실에 의해 연료전지 스택의 출력전압은 평형전위보다 항상 낮게 나온다. 이 손실을 분극 (Polarization)이라 하고, 수소기체가 전극에 달라붙어 전자의 흐름을 방해해서 전압강하가 발생되는 현상이며 이로 인해 비선형 특성이 발생되게 된다. 분극 현상은 크게 세 가지로 구분할 수 있다.

첫째로, 활성화 분극(Activation polarization)이다. 이것은 전극 촉매 반응과 연관이 있으며, 전극표면에서 발생하는 반응의 속도 차로 인해 발생한다. 화학반응을 일으키기 위해 필요한 전하의 이송에 일부 에너지가 소모되는데 이 에너지 소모가 전압강하로 나타난다. 활성화 분극은 타펠 방정식 (Tafel equation)의 일반적인 형태로 표현이 가능하다. 이 영

역은 PEMFC와 같은 저온형 연료전지의 경우 가장 큰 전압 손실이 발생되며 급격한 기울기를 갖는다. 식 (8)은 타펠 방정식을 나타낸다.

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_o} \tag{8}$$

여기서, α는 전이계수, n은 반응에 참여한 전자의 개수, i_o는 교환전류밀도, i는 전류밀도를 나타낸다. 활성화 분극을 줄이려면 온도를 높이는 방법, 좋은 촉매를 사용하여 전이계수를 높이는 방법, 다공성 전극을 사용하거나 반응면적을 넓히는 방법 그리고 전극의 표면적을 넓혀 교환전류밀도를 크게 하는 방법 등을 사용해야 한다.

둘째로, 저항 분극 (Ohmic polarization)이다. 이것은 전해질 저항, 전극 저항, 도선의 고유저항 및 연결부의 접촉저항에서 발생하는 전압강하이이며 대부분의 저항 손실은 전해질에서 발생된다. 이 영역은 전류밀도에 비례하는 거의 일정한 기울기를 가지는 선형영역이며, 실질적인 연료전지의 운전영역이다. 일반적으로 정격운전전압은 0.6V 정도이다. 식 (9)는 저항 분극을 나타낸다

$$\eta_{ohmic} = IR_T \tag{9}$$

여기서, $R_T=r_i+r_e+r_c$이고, r_i는 이온저항, r_e는 전기저항, r_c는 접촉저항이다. 저항 분극을 줄이기 위해서는 전도도가 높은 전극사용 및 전해질의 두께를 줄이는 방법이 효과적이다. 그러나 전해질의 두께가 너무 얇아지면 기계적 강도가 저하되어 압력에 의해 전해질 막이 찢어지는 문제가 발생될 수 있기 때문에 적절한 상호절충이 필요하다.

셋째로, 농도 분극 (Concentration polarization or Mass transport loss)이다. 이것은 반응물의 농도 기울기가 발생하는 것에 의한 전압손실로 전하나 이온 등의 반응물이 전극 표면으로 원활하게 전달되지 못하여 발생되는 전압강하이다. 이 영역은 매우 급격한 전압강하가 발생되어 실제로 사용되지 않는 영역이다. 식 (10)은 농도분극을 나타낸다.

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \tag{10}$$

마지막으로, 연료손실 (Fuel crossover)과 내부전류 (Internal current)로 인한 손실이 발생된다. 이것은 이온 전도성을 띤 전해질이라고 하더라도 미소 연료량이 이온화 되지 못하고 산소극으로 넘어가 직접 산소와 반응하는 현상을 말하며, 외부로 유출되는 전자 없이 열손실만 일으키는 구간이다. 고온형 연료전지의 경우 전해질 특성 때문에 거의 나타나지 않지만 PEMFC와 같은 저온형 연료전지의 경우 비교적 큰 전압 손실로 나타난다.

4.3 교환전류밀도

부하가 인가되지 않은 경우, 즉 전류밀도가 0일 때 전극에서의 반응은 발생하지 않는다. 그러나 실제 연료전지의 전극반응은 항상 발생한다. 정반응과 역반응의 비율이 같기 때문에 실제로 반응이 발생하지 않는 것처럼 보이며 이러한 전극과 전해질에서의 지속적인 정반응과 역반응 전류를 교환전류 (Exchange current)라고 한다. 식 (11)은 이런 반응을 보여준다.

$$O_2 + 4e^- + 4H^+ \leftrightarrow 2H_2O \tag{11}$$

교환전류밀도는 촉매, 촉매면적, 전극면적, 반응물의 분압, 온도 및 활성화 에너지 등에 의해 좌우되며, 비례한다. 또한 교환전류밀도가 크면 활성화 분극이 줄어든다. 때문에 연료전지의 효율에 매우 중요한 파라미터 중 하나이며 식 (12)와 같이 표현된다 [11].

$$I_o = I_o^{ref} a_c L_c \left(\frac{P_r}{P_r^{ref}}\right)^{\gamma} \exp\left[-\frac{E_c}{RT}\left(1 - \frac{T}{T_{ref}}\right)\right] \tag{12}$$

여기서, I_o^{ref}는 표준온도 및 압력에서 실제 촉매 도포면적에서의 기준 교환전류밀도, a_c는 종에 따른 촉매면적, L_c는 촉매도포면적, 그리고 γ는 반응물에 따른 반응차수, E_c는 활성화 에너지이다.

제한전류밀도 (Limit current density)는 휙크의 확산법칙 (Fick's diffusion law)과 이상기체 방정식 (Ideal gas equation)의 관계를 이용하여 구할 수 있다. 식 (13)은 제한전류밀도를 나타낸다.

$$i_L = \frac{nFDP}{RT\delta} \tag{13}$$

여기서, D는 확산계수, δ는 확산층의 두께이다.

4.3 연료전지 스택 운전전압

PEMFC 스택의 운전전압은 평형전위에서 각 분극으로 인한 손실을 뺀 전압이다. 이 중 활성화분극과 농도분극은 압력에 영향을 받고, 출력 V-I 특성 역시 압력의 함수이기 때문에 유량 변화에 따른 압력도 PEMFC의 출력 특성을 알기 위하여 고려되어야 할 요소이다. 그러므로 비선형 출력특성을 갖는 최종적인 PEMFC의 운전전압은 식 (14)와 같이 표현된다.

$$V_{cell} = E - (i+i_n)r - A\ln\left(\frac{i+i_n}{I_n^{ref} a_c L_c \left(\frac{P_r}{P_r^{ref}}\right)^{\gamma} \exp\left[\frac{E_c}{RT}\left(1-\frac{T}{T_{ref}}\right)\right]}\right) + B\ln\left(1 - \frac{i+i_n}{i_l * P}\right) \tag{14}$$

여기서, $A = \frac{RT}{\alpha nF}$, $B = \frac{RT}{nF}$는 타펠기울기 (Tafel slope)이다.

4.4 연료전지 동특성

PEMFC은 반응을 위해 전자를 모으는 과정에서 전해질 막에 모인 전자와 수소이온에 의해 막 표면에서 전위차가 발생되며 전자 이동저항 및 전극/전해질 계면의 이중층에 의한 커패시터의 병렬 구조인 전하이중층 (Charge double

layer) 현상으로 설명된다. 이 특성으로 인해 스택 출력전압은 급격한 전류 변동에 대해 전압은 지수함수적으로 변화되는 특성을 나타내며 식 (15)와 같이 표현된다. 그림 5는 연료전지의 전기적 등가 모델을 나타낸다.

$$\tau = CR_a = C\left(\frac{V_{act}+V_{con}}{i_{FC}}\right) \tag{15}$$

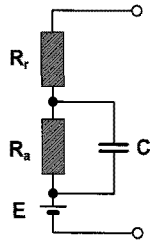


그림 5 PEMFC의 전기적 등가회로
Fig. 5 Electrical equivalent circuit of PEMFC

한편 실제 연료전지에서는 연료를 공급하기 위한 개질기 (Reformer), 블로어, 컴프레서, 가습기 (Humidifier), 솔레노이드 밸브, 전극판 (Bipolar plate) 등 다양한 기계적 주변장치 (Mechanical balance of plant, MBOP)가 존재한다. 스택 내부의 전기화학적 반응은 매우 빠른 반면 MBOP에 의한 기계적 시상수는 매우 느리므로, 전류밀도의 급격한 변화에 따른 실제 출력전압은 매우 큰 전압 강하와 전하이중층 현상에 의한 느린 전압 회복현상을 갖는다. 이러한 동특성은 스택의 종류와 MBOP 등에 의해 전압강하의 크기 및 회복시간이 매우 큰 차이를 나타내기 때문에 수학적 모델링으로 접근하는 것이 거의 불가능하다. 따라서 측정데이터를 근거로 동특성 출력전압을 식 (16)과 같이 1차 시지연 시스템의 완전응답으로 나타내었다.

$$V_{FC_dynamics} = V_{steady}\left(1-e^{-t/\tau}\right) \tag{16}$$

5. 시뮬레이션 및 실험결과

전기화학반응식으로 모델링한 결과를 MATLAB Simulink를 이용하여 동특성 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 제안된 PEMFC 동특성 시뮬레이션 모델의 타당성 검증을 위하여 연료전지의 성능지표에 따른 다양한 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1과 같다.

5.1 성능변수 변화에 따른 PEMFC 특성 시뮬레이션

그림 6은 개발한 PEMFC 시뮬레이터를 사용하여 전류밀도에 따른 PEMFC 단위 셀의 전압손실과 전형적인 비선형 출력전압에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 또한 그림 6의 하단부는 전류밀도에 따른 각 분극의 크기를 나타낸다. 활성화 분극이 지배적인 경부하 조건에서는 전류밀도변화에 대한 전압강하가 매우 크게 나타나고, 저항 분극이 지배적인

표 1 시뮬레이션에 사용된 연료전지 파라미터 [8-11]
Table 1 Simulation parameter

변수	값	변수	값
T	343.15 K	R_T	0.1 ohm.cm-2
A	0.06	I_o^{ref}	0.0017 mA.cm-2
B	0.05	a_c	1100 cm2.mg-1
i_n	2 mA.cm-2	L_c	0.15 mg.cm-2
i_l	900 mA.cm-2	P_r^{ref}	1 bar
P_r	0.5-1 bar	T_{ref}	298.15 K
γ	2	N	50
E_c	28,000 J.mol-1		

정격부하까지는 1차함수로 감소하는 선형영역이 존재한다. 그리고 과부하 조건에서 운전할 경우 농도 분극으로 인한 급격한 전압강하가 발생되며, 만약 PCS가 이 영역까지 운전을 하게 되면 PEMFC 스택에 악영향을 미치므로 PCS의 입력전류 및 연료전지 출력전류에 대한 모니터링 및 제어 그리고 보호회로가 반드시 필요하다.

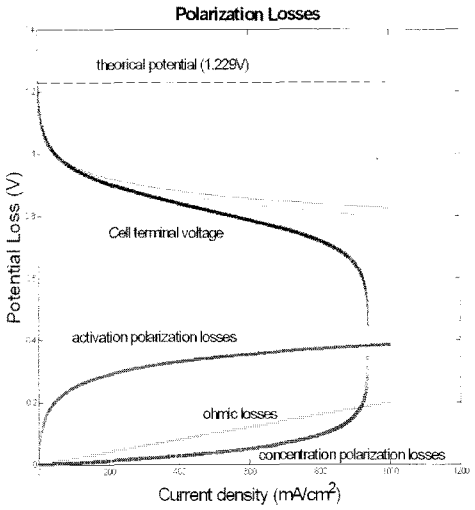
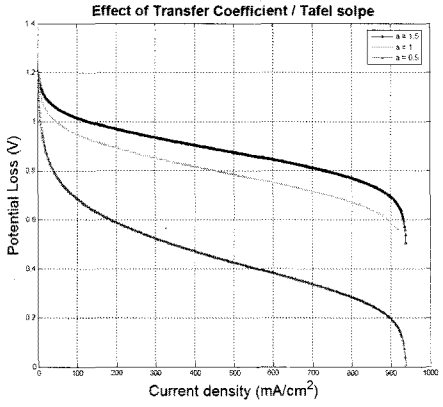


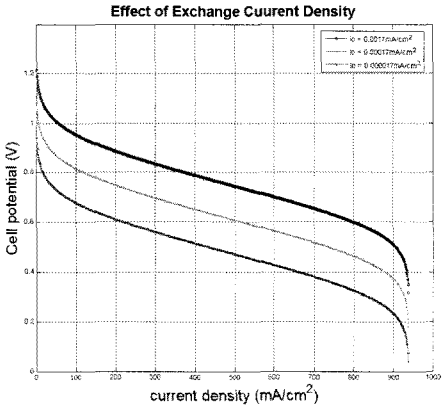
그림 6 분극 손실과 단위 셀의 비선형 V-I 특성곡선
Fig. 6 Nonlinear V-I characteristic curve of polarization losses and unit cell

그림 7은 제안된 시뮬레이터를 통해 활성화 분극에 영향을 주는 요소를 확인한 시뮬레이션 결과이다. 그림 7(a)는 전이계수 변화에 따른 셀 전압의 변화를 나타낸다. 전이계수가 높을수록 활성화 분극이 작아져 셀 출력 전압강하가 작은 것을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 연료전지의 성능을 판단하는 매우 중요한 요소인 교환전류 밀도에 따른 출력전압특성을 나타낸다. 교환전류밀도가 클수록 전체 전압손실이 매우 크게 줄어드는 것을 볼 수 있고, 이를 통해 연료전지의 출력 성능이 교환전류밀도와 비례한다는 것을 확인할 수 있다.

그림 8(a)는 시뮬레이터의 내부저항 변수를 0.1Ω부터 0.3Ω까지 단계적으로 증가시키며 내부저항 변화에 따른 셀 전압강하의 변화를 나타낸 것이다. 정격전류 조건에서 전압강하의 비율이 더 크다는 것을 확인할 수 있으며, 이는 연료전지가 약속부하조건에서 운전할 경우 지속적으로 정격전력에



(a)



(b)

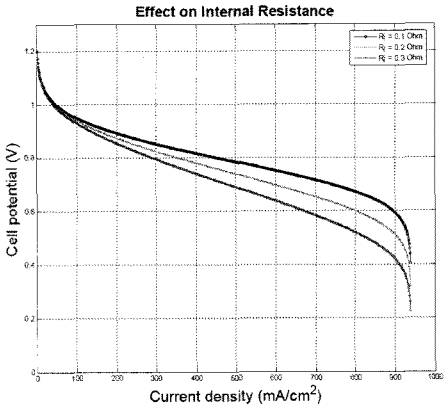
그림 7 성능변수에 따른 단위 셀 전압 특성-I (a) 전이계수와 타펠 기울기의 영향, (b) 교환전류밀도의 영향

Fig. 7 Voltage characteristics of unit cell according to performance index-I (a) effect of transfer coefficient and Tafel slope, (b) effect of exchange current density

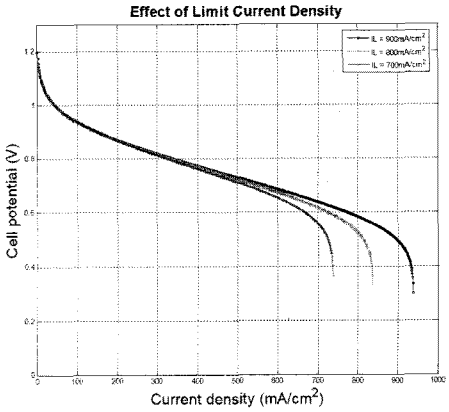
서 운전하기 때문에 내부저항의 영향을 크게 받는다는 것을 나타낸다. 따라서 내부저항 역시 연료전지 스택의 성능을 결정하는 중요한 요소가 된다. 그림 8(b)는 제한 전류 밀도에 대한 영향을 나타낸다. 제한 전류 밀도가 작을수록 실제 얻을 수 있는 전류의 양이 감소되는 것을 알 수 있다. 그러나 단위 셀 전압 손실은 활성화 분극, 저항 분극과 달리 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

셀 전압은 활성화 분극 및 저항 분극과 반비례 관계에 있고, 이 중 활성화 분극은 전이계수, 타펠 기울기, 교환전류밀도와 반비례 관계라는 것을 알 수 있다. 그리고 셀 전류에는 농도분극이 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

그림 9는 유량 변화에 따른 셀 전압과 전력을 나타낸다. 연료전지 시스템의 출력전압은 유량변화에 따라 네른스트 방정식으로 결정되는 전극전위, 제한전류 및 교환전류 밀도가 변하고 유량에 비례하여 전체적인 V-I 특성곡선이 변하게 된다. 때문에 유량제어는 매우 중요하며, 실제 시스템에서는 유량 제어기 (Mass Flow Controller, MFC)를 사용하여 유량을 제어한다. 셀 전력 또한 유량에 따라 변하게 되며 유량이 적을수록 전력량도 비례하여 적어지게 된다.



(a)



(b)

그림 8 성능변수에 따른 단위 셀 전압 특성-II (a) 내부 저항의 영향, (b) 제한전류밀도의 영향

Fig. 8 Voltage characteristics of unit cell according to performance index-II (a) effect of internal resistance, (b) effect of limit current density

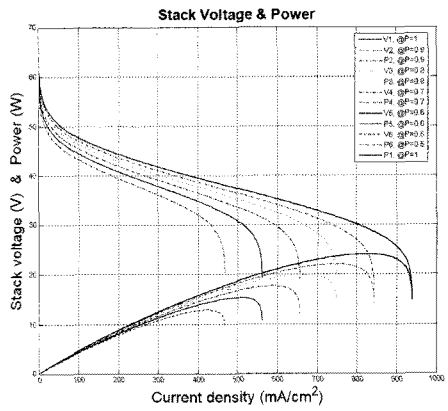


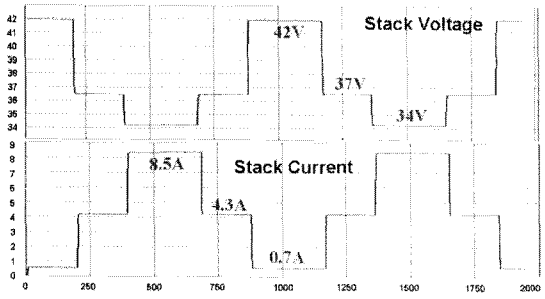
그림 9 수소와 산소 유량에 따른 영향

Fig. 9 Effect of fuel and oxygen mass flow

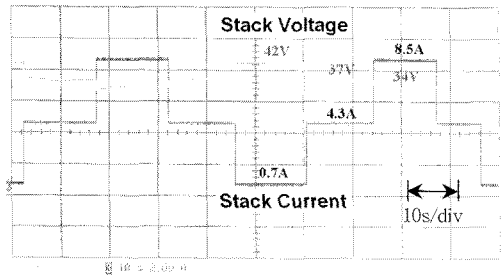
5.2 실험 및 시뮬레이션 튜닝 결과

제안된 PEMFC 시뮬레이터의 타당성 검증을 위해 부하 변동에 따른 출력 전압 및 전류 변화를 제안된 모델의 시뮬

레이션과 Ballard사의 Nexa 1.2kW PEMFC 실험을 통하여 비교 검증하였다. 부하는 KIKUSUI사의 전자부하기 PLZ334W가 사용되고, 30W, 160W, 300W 스텝으로 인가하였다. 그림 10(a)는 제안된 PEMFC 시뮬레이터의 출력 전압 및 전류 파형을 나타내고, (b)는 실제 실험파형을 나타낸다. 제안된 PEMFC 시뮬레이터의 변수 튜닝으로 Nexa 1.2kW PEMFC의 비선형 출력특성을 잘 반영하고 있음을 보여준다.



(a)

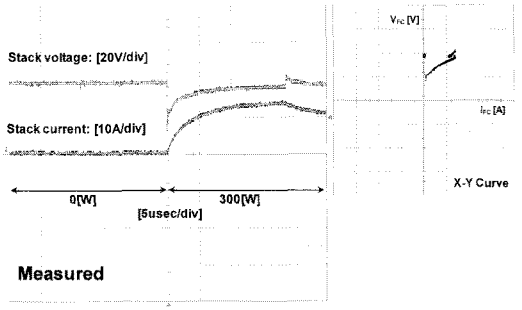


(b)

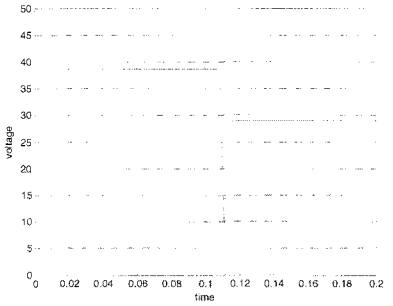
그림 10 부하변화에 따른 PEMFC 스택 전압 및 전류 (a) PEMFC 모델 시뮬레이션 파형, (b) Ballard Nexa PEMFC 실험 파형

Fig. 10 PEMFC stack voltage and current waveforms according to load step change, (a) simulation waveforms of PEMFC simulation model, (b) experimental waveforms of Ballard Nexa PEMFC

그림 11(a)는 0→300W로 스텝변화 시 실험파형, (b)는 실험결과를 시뮬레이션 모델에 적용한 시뮬레이션 결과 파형을 나타낸다. 전극에서의 전기화학반응은 매우 빠르므로 양극판 (Bipolar plate)의 유로에 존재하던 수소와 산소가 급속히 반응하여 전력을 출력한다. 그러나 연료공급모듈의 느린 시상수로 인해 부하에 전력을 공급할 연료가 충분히 재유입되기 까지 연료전지 전압은 약 15V로 (ΔV=19V) 강하되고 전하이중층 현상에 의한 회복현상을 갖는다. 실험에 사용된 Nexa 1.2kW PEMFC은 순수 수소 직입형이므로 상대적으로 빠른 동특성을 갖지만, 수소 개질기 (Reformer)를 갖는 PEMFC이나 고온에서 동작하는 용융탄산염 연료전지 (MCFC), 고체산화물 연료전지 (SOFC) 등은 매우 느린 동특성을 갖는다. 따라서 연료전지 동특성 시뮬레이션 프로그램은 연료전지의 종류 및 동작특성에 따라 전압강하의 크기 및 회복시간을 튜닝하여 PCS 시뮬레이션 시 적용 가능도록 개발되어야 한다.



(a)



(b)

그림 11 부하 스텝변화 시 출력전압 동특성 (0 → 300W) (a) 동특성 실험파형, (b) 동특성 시뮬레이션 파형

Fig. 11 Output voltage dynamics at load step change (0 → 300W) (a) experimental waveforms, (b) simulation waveforms of dynamics

5.3 시뮬레이션 모델의 PCS 입력전원 적용 시뮬레이션

제안된 PEMFC 모델의 입력전원으로의 활용 가능성을 검증하기 위하여 MATLAB Simulink-PSIM 연계 시뮬레이션을 수행하였다. PCS는 승압형 dc-dc 컨버터를 선택하였고 PSIM으로 구성하였으며 시뮬레이션에 사용된 컨버터는 Vin=26~50Vdc, Vout=100Vdc, fsw=30kHz, L=500uH, C=150uF, R=40, 20, 10Ω이 사용되었다. 제안된 PEMFC 시뮬레이터는 Ballard사의 Nexa 1.2kW PEMFC와 동일한 출력특성을 갖도록 변수를 튜닝하였다. PSIM으로 구성된 PCS와 제안된 PEMFC의 연계 운전은 *Simcoupler_R11 bock*을 이용하여 수행되었으며, 그림 12는 시뮬레이션 구성도를 나타낸다.

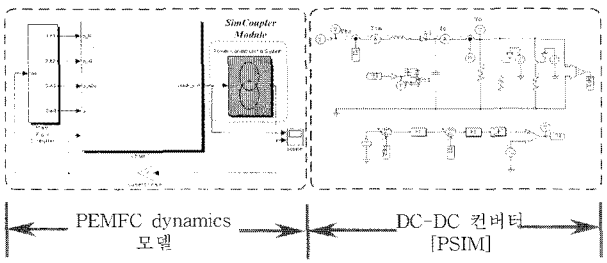
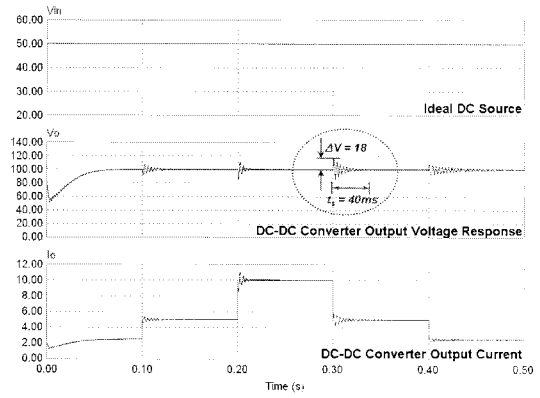


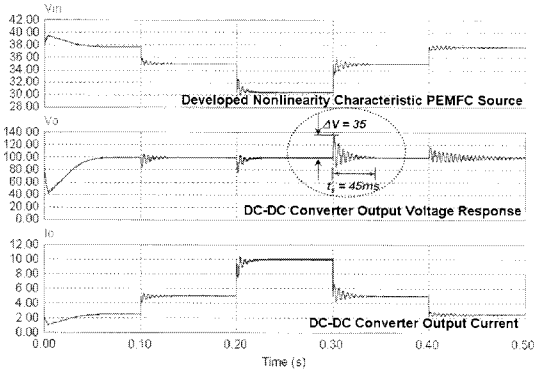
그림 12 PEMFC 모델과 PCS의 연동 시뮬레이션 구성도

Fig. 12 Co-simulation schematic of PEMFC and PCS

그림 13은 PEMFC 모델과 PCS 연동 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 13(a)는 이상적인 직류 전압원 인가 시 부하 변화에 따른 dc-dc 컨버터 출력 응답을 나타내며, 그림 13(b)는 제안된 PEMFC 전원 인가 시 부하변화에 따른 dc-dc 컨버터 출력 응답을 보여준다. 이상적인 전압원인 경우와 비교하여 연료전지 전원이 입력 된 경우, PCS의 PI 제어기 계인 등 모든 조건이 동일하더라도 시스템 출력 응답의 퍼센트 오버슈트 (Percent Overshoot, PO)는 약 100% 크게 나타나고 장착시간 (Settling time)은 약 10% 이상 소요되어 제어성능은 달라지는 것을 알 수 있다. 이는 연료전지 특성 시뮬레이션 모델을 사용하면 더욱 현실적인 PCS 출력 특성을 시뮬레이션 할 수 있으며, 따라서 연료전지용 PCS의 최적 설계를 위하여 연료전지의 동특성 모델링 및 시뮬레이션 모델 개발이 반드시 필요하다는 것을 의미한다.



(a)



(b)

그림 13 PEMFC 모델과 PCS 연동시뮬레이션 결과 (a) 이상적인 직류 전압원 인가 시 출력응답, (b) PEMFC 모델 인가 시 출력응답

Fig. 13 Co-simulation results of PEMFC and PCS (a) output voltage response when applying ideal dc source, (b) output voltage response when applying PEMFC source

6. 결 론

본 논문에서는 연료전지용 PCS의 최적설계를 위해 PEMFC를 전기화학 방정식으로 모델링하고 이를 기반으로 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 제안된 시뮬레이션 프로그램이 실제 연료전지의 비선형 출력 특성과 동특성을 완벽하게 모사하는 것을 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하여 검증하였다. 또한 연료전지용 PCS 시뮬레이션 시 제안한 시뮬레이션 프로그램이 입력조건으로 활용 가능하다는 것을 MATLAB Simulink와 PSIM 연동 시뮬레이션을 통해 입증하였고, 모든 조건이 동일하더라도 입력전원이 이상적인 직류전압원에서 연료전지 전압원으로 대체 될 경우 출력 응답이 달라지는 것을 통하여 PEMFC 모델링 및 PCS에 적용 가능한 시뮬레이션 프로그램의 필요성을 확인하였다. 향후 개발된 PEMFC 동특성 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 연료전지용 PCS의 하드웨어 및 제어기 최적 설계기법에 대하여 연구를 수행할 계획이다.

참 고 문 헌

[1] J. S. Kim, G. Y. Choe, H. S. Kang, B. K. Lee, W. Y. Lee, "Comparative analysis of PCS for fuel cell systems considering low frequency current ripple," 2007 *Fuel Cell Seminar,* October 2007, San Antonio, USA.

[2] D. K. Choi, B. K. Lee, S. W. Choi, C. Y. Won, "A novel power conversion circuit for cost-effective battery-fuel cell hybrid systems," J. of Power Sources, vol. 152, pp. 245-255, 2005.

[3] D. Yu, S. Yuvarajan, "A Novel circuit model for PEM fuel cells," APEC '04. Nineteenth Annual IEEE, vol. 1, pp. 362-366, 2004

[4] M. J. Khan, M. T. Iqbal, "Modeling and analysis of electro-chemical, thermal, and reactant flow dynamics for a PEM fuel cell system," Fuel cells 05, vol. 5, Issue 4, pp. 463-475, 2005

[5] W. J. Choi, J. W. Howze, P. Enjeti, "Development of an equivalent circuit model of a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current," J. of Power Sources, vol. 158, pp. 1324-1332, 2006

[6] D. Natarajan, T. V. Nguyen, "Three-dimensional effects of liquid water flooding in the cathode of a PEM fuel cell," J. of Power Sources, vol. 115, pp. 66-80, 2003

[7] 김희준, "스위치모드 파워서플라이," 성안당

[8] 차일남, 박준철, 조은애, 임태훈, 손지원, 김민수, 김관영, 김세훈, 임태원, 홍성안, "연료전지 자동차 - 이론과 실제." 도서출판 아진

[9] James Larminie, Andrew Diks, "Fuel cell system explained, 2nd ed.," John Wiely

[10] Ballard Power Web Page. [Online]. Available: http://www.ballard.com/

[11] A. Rowe, X. Li, "Mathematical modeling of proton exchange membrane fuel cells," J. of Power Sources, vol. 102, pp. 82-96, 2001

저 자 소 개

김 종 수 (金 鍾 秀)

1975년 3월 5일생. 2006년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2008년 성균관대학교 전자전기컴퓨터 공학과 졸업 (석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터 공학과 박사과정. 2000년 2월-2004년 7월 SEMIKRON Solution Centre Asia Application Engineer.
Tel : 031-299-4638
E-mail : sniper75@skku.edu

최 규 영 (崔 奎 英)

1980년 4월 11일생. 2006년 건양대학교 정보제어공학과 졸업. 2008년 성균관대학교 전자전기컴퓨터 공학과 졸업 (석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터 공학과 박사과정.
Tel : 031-299-4638
E-mail : lovesagaji@skku.edu

강 현 수 (康 鉉 受)

1971년 9월 23일생. 1994년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1996 년 3월-1999년 11월 LG 산전 중앙연구소 주임 연구원. 2000년 11월-현재 (주)에이디티 책임연구원
2006년 8월-현재 성균관대학교 전자전기컴퓨터 공학과 박사과정.
Tel : 031-299-4638
E-mail : ceny71@skku.edu

이 병 국 (李 秉 國)

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 2001년 Texas A&M University 전기공학과 졸업 (공박). 2002년 1월-2003년 1월 Postdoctoral Research Associate, Texas A&M University. 2003년 4월-2005년 9월 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전자그룹 선임연구원(팀장)
2006년 3월-현재 성균관대학교 정보통신공학부 조교수. ICEMS2007 및 Intelec2009 General Secretary, IEEE Senior Member.
현재 당 학회 영문지 Editor, 학술 및 편집위원, B부문 편집 부위원장.
Tel : 031-299-4581
Fax : 031-299-4639
E-mail : bkleeskku@skku.edu