

# 다변수 최적화 기법을 이용한 자동차용 고분자 전해질형 연료전지 시스템 모델링에 관한 연구

김한상\*, 민경덕, 전순일, 김수환, 임태원, 박진호

## A Study of Modeling PEM Fuel Cell System Using Multi-Variable Optimization Technique for Automotive Applications

Han-Sang Kim, Kyoungdoug Min, Soonil Jeon, Soo-Whan Kim, Tae-Won Lim, Jinho Park

**Abstract** This study presents the integrated modeling approach to simulate the proton exchange membrane (PEM) fuel cell system for vehicle application. The fuel cell system consisting of stack and balance of plant (BOP) was simulated with MATLAB/Simulink environment to estimate the maximum system power and investigate the effect of BOP component sizing on system performance and efficiency. The PEM fuel cell stack model was established by using a semi-empirical modeling. To maximize the net efficiency of fuel cell system, multi-variable optimization code was adopted. Using this method, the optimized operating values were obtained according to various system net power levels. The fuel cell model established was co-linked to AVL CRUISE, a vehicle simulation package. Through the vehicle simulation software, the fuel economy of fuel cell powered electric vehicle for two types of driving cycles was presented and compared. It is expected that this study can be effectively employed in the basic BOP component sizing and in establishing system operation map with respect to net power level of fuel cell system.

**Key words** PEM fuel cell(고분자전해질형 연료전지), Stack(스택), BOP(주변 장치), Multi-variable optimization(다변수 최적화), Vehicle simulation(차량 시뮬레이션)

\* 서울대학교 기계항공공학부

■ E-mail : hsk007@plaza.snu.ac.kr ■ Tel : (02)874-6539 ■ Fax : (02)874-2001

## 1. 서론

최근 전세계적으로 환경 오염에 대한 관심이 크게 대두되면서 자동차 배기가스 배출물을 근본적으로 저감하기 위한 노력이 선진 각국 자동차 회사들 간에 적극적으로 진행되고 있다. 그러나, 기존의 내연기관만으로는 보다 엄격해지는 CO<sub>2</sub> 및 각종 유해 배출물 규제에 대응하기에는 근본적인 한계가 있는 실

정이다. 따라서, 대다수의 자동차 회사에서는 CO<sub>2</sub> 배출을 효과적으로 줄이고, 파워트레인의 효율을 향상시켜 연비를 개선할 수 있는 효율적인 대안으로 연료전지 자동차의 연구 및 개발을 적극적으로 진행하고 있다.

연료전지는 전기화학적 반응을 통하여 연료의 반응 깃스(Gibbs) 에너지를 전기로 직접 변환하여 직류 전기를 생산하는 장치로 기존 에너지원보다 효율이 높으며 유해 배출물이 거의 없어 미래의 자동차 동력원으로 각광받고 있다. 연료전지는 사

용되는 전해질막의 종류에 따라 여러 형태로 분류되지만, 그 중 고분자전해질형 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell)는 낮은 작동 온도 (100℃ 미만), 높은 출력 밀도 및 부하 변동에 따른 빠른 응답성, 모듈화 및 안정성이 우수한 특성 등으로 인해 자동차의 동력원으로 적용되기에 가장 적합한 것으로 평가받고 있다.

국내외적으로 고분자전해질형 연료전지에 대한 연구는 대개 재료 및 전기화학적 접근을 통한 단위 연료전지의 전해질막과 촉매층의 성능 및 효율 향상을 위한 실험적 연구 개발에 집중되어 진행되어 왔다. 그렇지만, 고분자전해질형 연료전지를 자동차와 같은 시스템에 적용하기 위해서는 연료전지 스택 자체 뿐만 아니라 스택의 효율적인 운전을 위한 열, 유체, 열전달, 물질 전달 현상 등을 수반하는 주변 장치(BOP, Balance of Plant)를 포함한 연료전지 시스템이 구성되어야 하며 이에 대한 체계적인 분석과 시스템 성능 최적화를 위한 연구가 필수적이다.<sup>1)-9)</sup>

본 논문에서는 고분자전해질형 연료전지 스택과 주변 장치를 포함한 연료전지 시스템을 모델링하고 다변수 최적화 기법을 적용한 연료전지 시스템의 순효율 최적화 연구의 가능성을 제시하고자 한다. 이를 위하여 진행된 본 연구는 아래의 3가지 주요 내용으로 구성되어 있다.

1) 자동차용 고분자전해질형 연료전지 시스템 해석을 위해 필요한 연료전지 스택과 그 주변 장치를 MATLAB/Simulink로 모델링하였고, 주요 작동 변수에 따른 연료전지 성능을 고찰하였다.

2) 다변수 최적화 기법을 적용하여 시스템 구동 시 요구되는 출력 조건에 따른 공기극 압력 및 상대 습도 등 주요 작동 변수를 최적화할 수 있는 기법을 제시하였다.

3) 구축된 연료전지 시스템 모델을 차량 시뮬레이션과 연계, 수행하여 연료전지 시스템 주요 변수 및 주변 장치 사양 변화에 따른 연료전지 자동차의 연비 및 동력 소모 특성을 고찰하여 연료전지 자동차 통합 시뮬레이터의 구현을 위한 기초 가능성을 제시하였다.

## 2. 연료전지 시스템 모델링

### 2.1 자동차용 고분자전해질형 연료전지 시스템

Fig. 1은 본 연구에 적용된 상압형과 가압형 연료전지 시스템을 나타낸 것이다.

자동차용 연료전지 시스템은 스택으로 유입되는 공기를 어떤 압력 조건에서 공급하는가에 따라 크게 상압형과 가압형의 2가지로 분류된다. 상압형 시스템의 경우, 대기압보다 약간 높은 압력으로 공급되므로 공기 공급 장치로 블로워(blower)가 적용되는 반면, 가압형 시스템의 경우는 공급 공기 압력을 상승시켜 스택의 작동 성능을 향상시킬 목적으로 압축기를 사용하는 것이 주요한 차이점이다.

### 2.2 스택 모델링

본 연구에서는 기존 연구에서 제시된 연료전지 모델을 사용하여 단위 연료전지(unit cell)를 모델링한 후 이를 적층하여 스택 모델을 구성하였다.<sup>5)</sup>

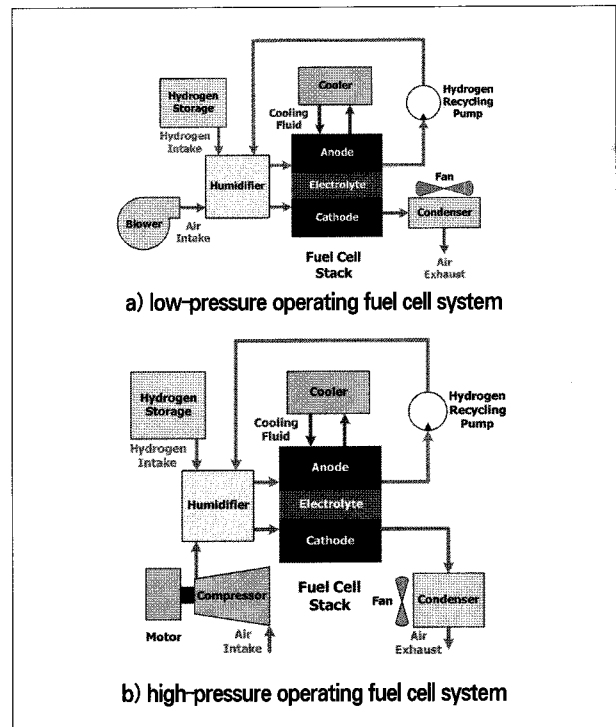


Fig. 1 Schematic diagram of operating fuel cell systems for automotive applications

## 2.2 스택 모델링

본 연구에서는 기존 연구에서 제시된 연료전지 모델을 사용하여 단위 연료전지(unit cell)를 모델링한 후 이를 적층하여 스택 모델을 구성하였다.<sup>5)</sup> 모델링된 단위 셀 하나의 면적을 기준으로 스택은 이를 적층하여 평균 최대 순출력 80kW를 만족하도록 구성하였다.

스택 모델에서는 스택의 온도와 공급 기체의 압력 및 습도 조건에 따라 전압과 전류 밀도 및 출력을 계산한다. 이 때 스택 공기극에는 공기를 공급하고, 수소극 쪽에는 수소 탱크에서 수소를 공급하는 것으로 생각하였다. 공기와 수소는 당량 조건보다 각각 2배와 1.2배로 공급하였다. 스택에서 사용되지 않은 수소는 수소 재순환용 펌프를 통하여 재순환되도록 하였다.

## 2.3 주변 장치 모델링

공기 공급 장치로는 상압형 시스템의 경우는 Turbomix 블로워와 원심(centrifugal) 블로워를 적용하였고, 가압형 시스템의 경우는 스크류 압축기와 Roots 블로워를 적용하였다. 관련 공급 장치의 효율은 각각의 성능 선도를 look-up table로 작성하여 모델링하였다. 압축기의 구동을 위한 모터의 효율은 85%로 일정한 것으로 가정하였다.

고분자전해질형 연료전지의 경우, 전해질의 수소 이온 전도도는 공급 기체의 상대 습도와 밀접한 관련이 있으므로, 스택에 공급되는 기체의 상대 습도를 세심하게 조절해 주어야만 한다.<sup>2)</sup> 연료전지로 공급되는 기체는 1차적으로 Fig. 1과 같이 스택에서 빠져나오는 고온 다습한 공기를 통하여 습도를 일정 수

준으로 높여준 후 부족한 수분은 Fig. 2에 제시된 것과 같은 인젝션 타입의 습도 조절 장치를 통하여 조절해 주도록 하였다.<sup>3)</sup>

스택 냉각을 위한 냉각판은 단위 셀 3개 당 하나가 존재하는 것으로 생각하여 스택의 온도 조절과 냉각 펌프 용량 결정을 위해 냉각수 유량과 냉각판에서 발생하는 압력 강하를 계산하였다. 이를 위해 냉각 장치에서 발생한 열량을 모두 냉각수가 흡수하는 것으로 가정하였다. 냉각수 펌프의 효율은 70%로 일정하다고 가정하였다.

## 3. 해석 결과

### 3.1 스택 온도 및 공급 공기 압력의 영향

Fig. 3은 스택 작동 온도에 따른 단위 연료전지의 성능을 나타낸 것이다. 공급 기체의 경우, 상대 습도 100%이고 압력은 1.5bar에서의 결과이다. 스택 작동 온도가 증가함에 따라 연료전지 성능은 개선됨을 알 수 있다. 그렇지만, 스택 온도가 증가함에 따라 연료전지 내의 습도를 유지하기 위해 요구되는 가습량의 증가로 인해 가습기에서 소모되는 동력이 증가하므로 시스템 효율 차원에서의 최적화 고려가 필요하다.

Fig. 4는 스택 온도를 일정하게 유지한 상태에서 공급 공기 압력을 변화시키면서 단위 연료전지 성능을 분석한 것이다. 공기 압력을 증가시킬 경우 단위 전지의 성능을 크게 개선된다. 가압형 시스템에서는 공급 공기 압력을 압축기를 통하여 증가시킬 수 있으므로 동일한 크기의 스택에서 보다 많은 출력을 뽑아내는 것이 가능하다.

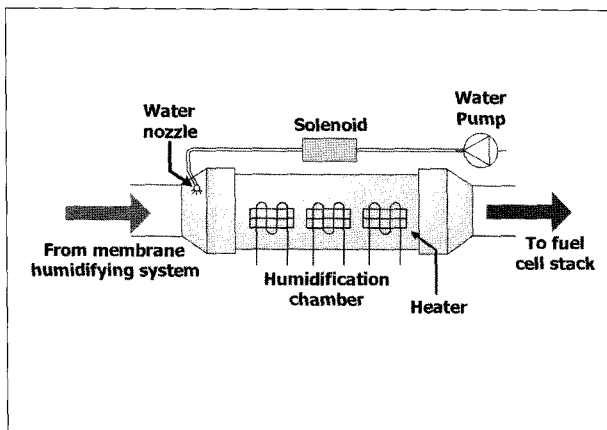


Fig. 2 Injection type humidifying system

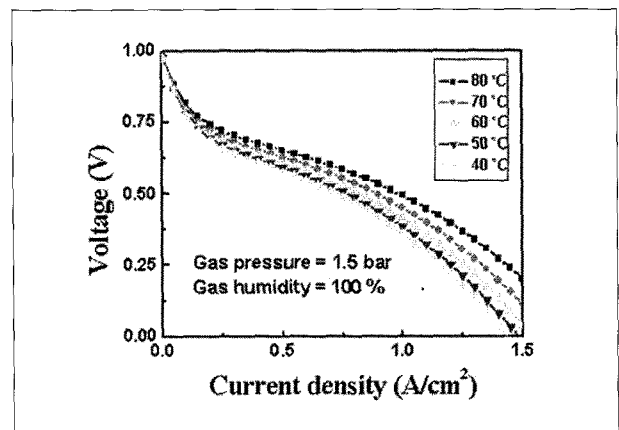


Fig. 3 Polarization curves at different stack temperatures

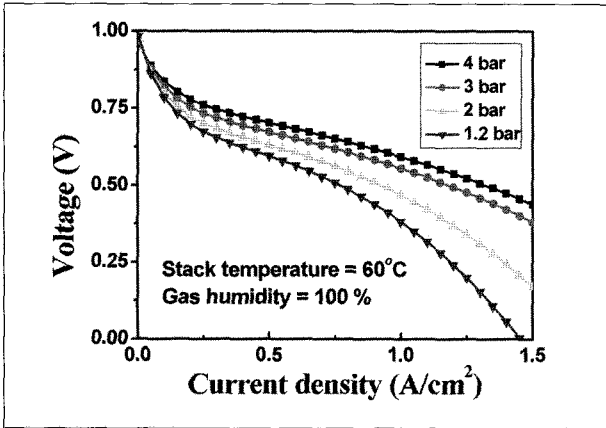


Fig. 4 Polarization curves at different inlet air pressures

### 3.2 다변수 최적화 기법의 적용

앞 절에서 제시된 바와 같이 연료전지의 성능은 스택 온도, 공급 가스의 압력, 상대 습도 등 많은 물리적 작동 변수에 의하여 크게 영향을 받는다. 더욱이 연료전지 시스템의 성능 및 효율은 스택뿐만 아니라 주변 장치의 성능 및 작동 효율에 의해서도 크게 좌우되므로, 최적화된 시스템을 구현하기 위해서는 스택 및 주변 장치를 모두 고려한 연료전지 시스템 전체 차원에서의 다변수 최적화 연구가 필수적이다.

본 연구에서는 ESTECO사에서 개발된 다변수 최적화 프로그램 modeFRONTIER를 적용하여 시스템 순효율이 최대화되는 연료전지 시스템의 최적 입력 파라미터들을 산출하였다.

실제의 연료전지 시스템 특성을 자세히 고찰하기 위해서는 많은 수의 작동 변수들을 대상으로 포함하여 다변수 최적화를 진행하여야 한다.

그렇지만, 본 연구에서는 다변수 최적화 연구의 가능성을 우선 제시하고 확인해 보기 위하여 주요 작동 입력 변수로는 시스템 순출력과 스택 온도의 2가지를 이용하였다. 출력값은 공기극 및 수소극의 상대 습도, 공기극 압력으로 하였다.

Fig. 5는 Turbomix 블로워 모델의 공기 공급 장치를 적용한 경우 시스템 순출력 50kW, 스택 작동 온도 60°C에서 다변수 최적화를 이용한 공급 기체 습도의 최적화 결과를 나타낸다. 공기 및 수소의 상대 습도 최적값이 나타나 있다. 이와 같은 방법을 이용하면 다양한 연료전지 시스템의 작동 조건에 따른 상대 습도, 공급 가스 압력 등 주요 작동 변수들의 최적값을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

### 3.3 차량 시뮬레이션과의 연계 결과

연료전지 시스템을 차량에 적용하는 경우, 연료전지 시스템의 효율이 차량의 가속 성능 및 연비 등 주요 평가 인자에 어떤 영향을 미치는지를 파악하는 것은 매우 중요한 과제이다. 본 연구에서는 연료전지 시스템 모델과 다변수 최적화 방법을 적용하여 얻어진 최적화 결과를 차량 시뮬레이션 프로그램에 적용하여 연료전지 자동차의 연비를 산정해 보았다.

차량 시뮬레이션을 위해서는 AVL사의 CRUISE 코드를 적용하였다. CRUISE의 경우, 가솔린 및 디젤 엔진을 탑재한 자동차, 하이브리드 자동차 등 다양한 종류의 차량에 대한 시스템 모델링 기능을 제공하여 성능 및 효율 등을 예측, 평가할 수

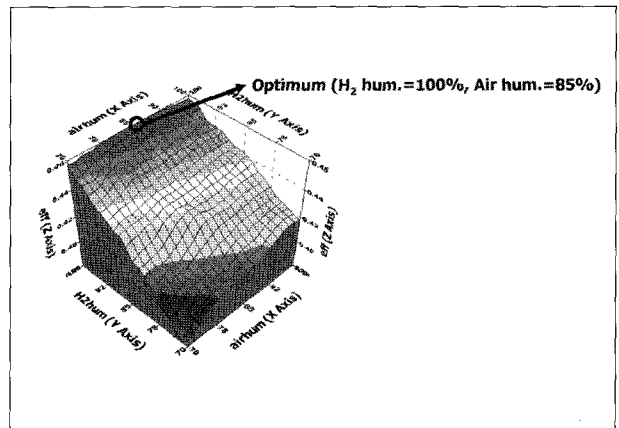


Fig. 5 Simulated results of input operating parameters by multi-variable optimization technique

Table 1. Comparison of consumed power level for four types of air supplying systems

	Power(kW)	
	UDDS	Highway
Screw compressor	6.48	19.6
Roots blower	6.61	19.8
Turbomix blower	6.67	20
Centrifugal blower	6.69	20.1

Table 2. Comparison of fuel economy according to number of stacked cells

No. of stacked cells	450	500
UDDS (km/l)	23.21	23.57
Highway (km/l)	16.96	17.25
Weight (kg)	1554	1570

있는 상용화 코드이다.

MATLAB/Simulink를 이용한 연료전지 모델에서 CRUISE의 차량 모델로 다변수 최적화를 포함해 얻어진 전류값을 전달하면 차량 주행 시뮬레이션을 수행하게 되고, 여기서 전압과 로드 시그널을 연료전지 시스템으로 전달하게 된다. 차량 시뮬레이션에 의한 연비 계산은 도심 주행 사이클(UDDS)과 고속 주행 사이클(Highway)의 2 종류의 주행 모드를 적용하여 수행되었다.

Table 1은 본 연구에 적용된 4가지 공기 공급 시스템에 대한 각 주행 모드에서의 평균 소모 동력을 나타낸 것이다. 공기 공급 시스템의 종류보다는 주행 모드에 따라 소모 동력이 크게 좌우됨을 알 수 있다. 이는 주행 모드의 종류에 따라 차속과 요구 출력이 크게 바뀌므로 이에 따른 공기 공급 장치의 작동점 변경에 따른 작동 변수의 변화가 보다 큰 영향을 미침을 나타낸다.

Table 2는 스크류 압축기를 적용한 연료전지 시스템을 탑재한 경우, 스택 적층 수에 따른 차량 시뮬레이션을 통한 연비 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

스택 적층 수를 450개에서 500개로 증가시킨 경우 2종류의 차량 주행 모드에서 연비를 비교할 때, 스택 적층 수가 증가한 경우의 연비가 개선됨을 알 수 있다. 이는 스택 적층 수 증가에 따른 연료전지 시스템의 전체 성능 개선 효과가 적층 수 증가에 따른 연료전지 시스템의 무게 증가로 인한 연비 악화 요인보다 상대적으로 크게 작용된 때문으로 분석될 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 자동차용 고분자전해질형 연료전지 시스템의 스택과 주변 장치에 대한 모델링과 이를 기초로 한 다변수 최적화를 적용한 통합 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연료전지 주변 장치를 포함한 상압형 및 가압형 시스템을 MATLAB/Simulink를 이용하여 모델링하여 주요 작동 변수들이 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

(2) 연료전지 시스템 모델링 결과를 차량 시뮬레이션과 연계하여 연료전지 시스템의 공기 공급 장치 등 각 사양의 변경에 따른 연료전지 자동차의 연비 및 각 장치의 소모 동력 등을 예측할 수 있는 기초를 마련하였다.

(3) 다변수 최적화 기법을 이용하여 연료전지 시스템의 작동 변수를 최적화하고, 이를 차량 시뮬레이션에 적용하여 초기 단계의 차량용 연료전지 통합 시뮬레이션 방안을 제시하였다. 이는 연료전지 자동차 차량 통합 시뮬레이션의 기초가 될 것으로 기대된다.

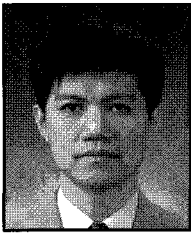
## References

- (1) James Larminie and Andrew Dicks, Fuel Cell System Explained, John Wiley & Sons, 2000.
- (2) James Howard Lee, "A Methodology for the Development of Mathematical Models for Simulation and Design of Fuel Cell Stacks", Ph. D. Thesis, Texas A&M University, 1996.
- (3) A. Wiartalla, S. Pischinger, W. Bornscheuer, K. Fierweger, and J. Ogrzewalla, "Compressor Expander Units for Fuel Cell Systems", SAE paper No. 2000-01-0380, 2000.
- (4) T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, and S. Gottesfeld, "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 138, No. 8, pp. 2334-2342, 1991.
- (5) Jay Taewee Pukrushpan, "Modeling and Control of the Fuel Cell Systems and Fuel Processors", Ph. D. Thesis, University of Michigan, 2003.
- (6) T. E. Springer, M. S. Wilson, and S. Gottesfeld, "Modeling and Experimental Diagnostics in Polymer Electrolyte Fuel Cells", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 140, No. 12, pp. 3513-3526, 1993.
- (7) D. Chu, R. Jiand, and C. Walker, "Analysis of PEM Fuel Cell Stacks using an Empirical Current-Voltage Equation", Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 30, pp. 365-370, 2000.
- (8) Trung V. Nguyen and Ralph E. White, "A Water and Heat Management Model for Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 140, No. 8, pp. 2178-2186, 1993.
- (9) Han-Sang Kim, Dong-Hun Lee, Kyoungdoug Min, and

Minsoo Kim, "Effects of Key Operating Parameters on the Efficiency of Two Types of PEM Fuel Cell Systems (High-Pressure and Low-Pressure Operating) for

Automotive Applications", Journal of Mechanical Science & Technology, Vol. 19, No. 4, pp. 1018-1026, 2005.

**김 한 상**



1989년 서울대학교 기계공학과 공학사  
1991년 서울대학교 기계공학과 공학석사  
2005년 서울대학교 기계항공공학부 공학박사

현재 서울대학교 기계항공공학부 박사 후 연구원  
(E-mail : hsk007@plaza.snu.ac.kr)

**민 경 덕**



1986년 서울대학교 기계공학과 공학사  
1988년 서울대학교 기계공학과 공학석사  
1994년 MIT 기계공학과 공학박사

현재 서울대학교 기계항공공학부 부교수  
(E-mail : kadmin@snu.ac.kr)

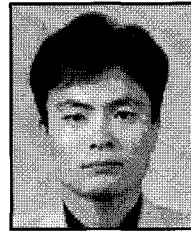
**전 순 일**



1997년 서울대학교 기계설계학과 공학사  
1999년 서울대학교 기계설계학과 공학석사  
2003년 서울대학교 기계항공공학부 공학박사

현재 현대자동차 연료전지시스템개발팀 선임연구원  
(E-mail : soonill@hyundai-motor.com)

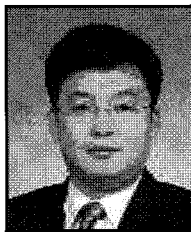
**김 수 환**



1992년 서울대학교 금속공학과 공학사  
1994년 서울대학교 금속공학과 공학석사  
2004년~ 펜실베이니아주립대 박사과정 중

현재 현대자동차 연료전지시스템개발팀 선임연구원  
(E-mail : soowhan@hyundai-motor.com)

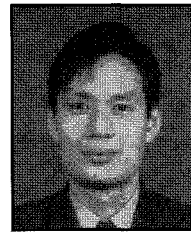
**임 태 원**



1984년 연세대학교 금속공학과 공학사  
1986년 뉴욕주립대학교 기계항공공학과 공학석사  
1991년 뉴욕주립대학교 기계항공공학과 공학박사

현재 현대자동차 연료전지시스템개발팀 수석연구원  
(E-mail : twlim@hyundai-motor.com)

**박 진 호**



1994년 서울대학교 기계설계학과 공학사  
1996년 서울대학교 기계설계학과 공학석사  
2000년 서울대학교 기계항공공학부 공학박사

현재 (주)엔지비 기술개발팀 팀장  
(E-mail : pjinho@ngvtek.com)