

전기자동차의 CAE 활용기술 소개

Introduction to the CAE Application for Electric Vehicle

한은실

E. S. Han

1. 서 론

자동차의 전자화는 화석연료의 고갈 및 안전 규제, 환경 규제, 지능형 자동차의 요구 등에 의해 자동차 업체들이 꼭 가야만 하는 길이다. 화석 연료의 가용 연수는 원유가 약 38년, 천연가스가 64년, 석탄이 약 192년 남아있다고 한다. 또한, 세계적으로 환경 규제가 심화되고 있다. 유로 연합은 Euro 4, CARB 규제를 발표했고, 또한 기후변화협약기구에서 CO₂를 강력하게 규제하고 있다. 여기에 자동차의 안전규제도 강화되면서 안전부품(TPMS, ABS, A/Bag 등)의 장착을 의무화하고 있으며 차량 전복 규제, 보행자 보호, 및 충돌시험 등으로 확대되고 있다. 또한 운전자의 편의성을 증대시키는 지능화 차량의 요구로 달리는 사무실과 같은 자동차 정보화 및 IT융합 기술이 발달하고 있다. 이와 같은 이유로 각국은 전기자동차의 개발에 박차를 가하고 있으며, 전기차 판매량은 그림1에서 보듯이 2011년 100만대에서 2015년 678만대, 2020년 천만대로 연평균 30% 증가할 것으로 전망되고 있다.¹⁾



그림 1 전기차 판매량 전망 (만대)

전기자동차는 일반 내연기관 자동차와는 달리 배터리, 전기모터, 인버터/컨버터, BMS(Battery Management System) 등으로 구성되어 있다. 배터리는 재충전이 가능한 2차 전기가 이용되며, 전기모터는 배터리를 통해 구동력을 발생시킨다. 이때,

직류와 교류 변환장치인 인버터와 컨버터의 역할 또한 중요하다. BMS는 배터리 관리 시스템으로 배터리의 충전·방전을 조절하며 전압·전류·온도 등을 감시하고, 냉각 제어 등을 수행한다.¹⁾

본 원고는 전기자동차의 주요 부품은 battery와 파워트레인을 설계하는 데 필요한 시뮬레이션 종류와 시뮬레이션 과정 등을 ANSYS사의 제품군을 적용하여 설명하고자 한다.

2. Battery Simulation

ANSYS사의 여러 제품들을 이용하여 아래와 같은 다양한 배터리 해석을 할 수 있다.

- 구조해석 : 정하중 해석, 진동해석, 충격해석, 열변형 해석, 피로해석 등
- 열해석 : 방열해석, Hot spot 해석
- 충격해석 : 충돌 시 배터리 팩 파손 해석
- 최적화해석 : 형상최적화 해석, 6-sigma 해석
- 다물리계 해석 : 전기전자-유동-구조 연성해석

이 중에서, 전기자동차와 같은 고전력 응용 분야에서, 배터리의 온도관리는 매우 중요하며, 온도관리 모델링은 엔지니어에게 더 나은 배터리 냉각 시스템을 설계하는 데에 필수적인 도구이다. 보통 배터리의 열 모델은 CFX나 Fluent와 같은 열유동 해석 프로그램들을 이용한다. 문제는 transient 해석의 시간이 너무 많이 소요된다는 것이다. 이것을 Foster Network를 사용한 배터리 열 모델로 변경해서 해석하게 되면 해석 시간을 획기적으로 단축시킬 수 있다. 기본적으로, Foster Network 에 필요한 캐패시턴스와 저항값들은 CFD (Computational Fluid Dynamics) 결과로부터 추출된다. 이것은 Battery의 응답 특성이 Linear Time Invariant (LTI) 특성을 갖기 때문에 가능하다.^{2,3)}

그림 2는 6개의 cell을 갖는 battery 모델이고, 그림 3은 첫 번째 cell에 인가한 파워에 따른 각 cell의 step 응답특성을 갖는 Foster network를 사용한 해석결과를 보여준다.

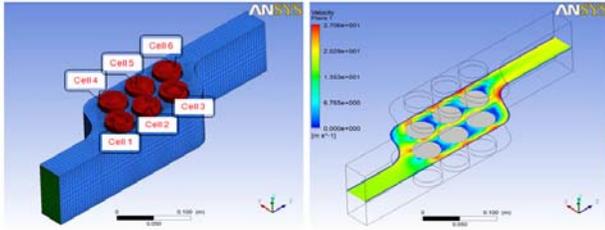


그림 2 6cell battery model

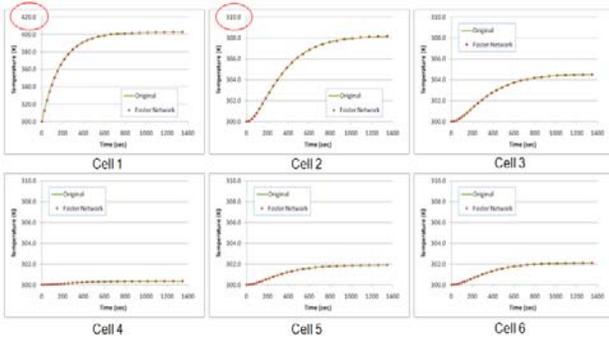


그림 3 The curve fitting of the step response for Foster Network

Cell1에 input을 가했을 때에 첫 번째 battery cell의 온도가 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 4는 Simplorer에서 battery module의 Foster Network를 보여준다. 몇 개의 crossing heating element는 거의 무시할만한 기여를 하기 때문에 (self heating에 비해 0.1% 정도의 기여) foster network에는 표현하지 않는다. 그림 5는 바로 이 Foster network 결과와 CFD 결과를 비교한 것이다. 임의의 sinusoidal Power Input에 대한 결과를 갈음을 알 수 있다.

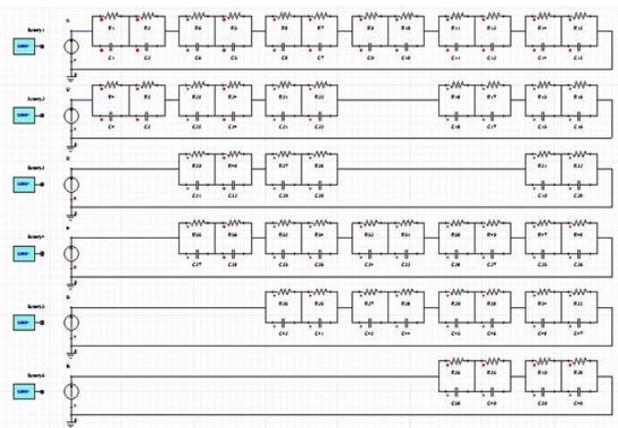


그림 4 Foster Network for the Battery Module in Simplorer

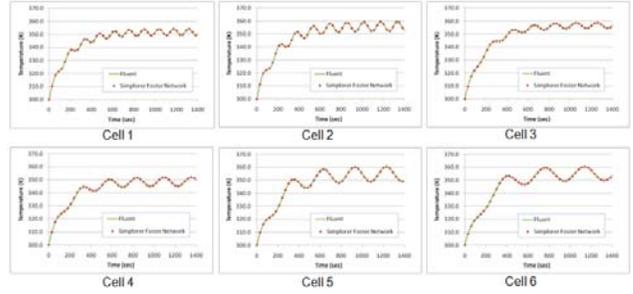


그림 5 Foster Network vs. CFD 결과

이 일련의 배터리 모델 추출 과정은 ANSYS의 시스템 레벨 시뮬레이션 툴인 Simplorer를 사용하여 자동적으로 이루어진다. 그림 6에서 이 과정을 차례대로 보여준다.

1

2

```

--Parametric analysis perform
--Symbol: "battery_temp.tif"
--System information
Ambient Temperature = 295.0
Number of points = 16
Number of trials = 16
--Trial information
trial001: Qcell1 0 Qcell2 0
trial002: Qcell1 0 Qcell2 1
trial003: Qcell1 0 Qcell2 0
trial004: Qcell1 1 Qcell2 0
trial005: Qcell1 0 Qcell2 0
trial006: Qcell1 0 Qcell2 0
trial007: Qcell1 1 Qcell2 0
trial008: Qcell1 0 Qcell2 0
trial009: Qcell1 0 Qcell2 0
trial010: Qcell1 0 Qcell2 0
trial011: Qcell1 0 Qcell2 0
trial012: Qcell1 0 Qcell2 0
trial013: Qcell1 0 Qcell2 0
trial014: Qcell1 1 Qcell2 0
trial015: Qcell1 0 Qcell2 0
trial016: Qcell1 0 Qcell2 0
--Points: heat flux variable s
block_1:P1.Qcell1
block_2:P2.Qcell2
    
```

3

4

그림 6 The model extraction process using Simplorer

- Step1 : CFD model을 생성해서 step 응답 곡선을 얻기 위한 몇 번의 CFD 해석을 수행.

- Step2 : text file 을 편집 (.simpinfo 파일)이 파일 내용은 모델링한 battery system에 관한 기본적인 정보임.
- Step3 : Simplorer가 CFD로부터 얻은 step 응답에 기초를 둔 thermal 모델을 자동적으로 추출함. 이 thermal model은 임의의 transient loss에서 battery cell 온도를 계산한 데 사용할 수 있는 모델이다.
- Step4 : 이렇게 추출된 모델의 결과는 원래의 CFD 모델로 해석한 결과와 같다. 하지만, 시뮬레이션 시간은 두 차수가 차이 날 정도로 빠르다.

3. Electric Power Dirve Train Simulation

전기자동차의 동력전달 장치인 파워트레인은 배터리, 모터, 인버터/컨버터 및 컨트롤러 등으로 구성되어 있다. 그림 7은 간단한 파워트레인의 구성도이다.

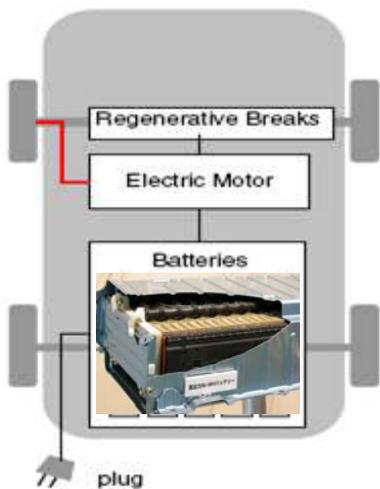


그림 7 EV Powertrain

** 그림출처 : High power Ni-MH Battery of Toyota NHW20 Prius

모터는 내연기관 자동차의 엔진을 대체하여 자동차 구동을 가능하게 하며, 전기차 원가의 20%를 차지하고 25kW~100kW급까지 다양한 제품군들로 형성되어 있다. 또한, 이 모터의 제어를 담당하는 컨트롤러 역시 중요한 부품이다. 배터리의 직류 전류를 교류로 변환하기 위한 인버터는 원가의 23% 정도를 차지하고 있고, 고용량, 소형/경량화가 중요한 이슈이다. 또한, 인버터의 EMC (Electro Magnetic Compatibility)는 전기 자동차 규격과 관련하여 매

우 엄격하게 관리되는 대상이다. 자동차의 여러 전자장치를 이용하기 위해서 필요한 컨버터는 교류를 직류로 또는 직류를 직류로 변환해주는 장치로써 원가의 7%를 차지하며 내구성 및 신뢰성 확보가 중요한 고려 대상이다.

그림 8은 전원단(이 전원 부분을 배터리로 대체하면 전기자동차의 전원단이 됨), LISN, 인버터, 모터 컨트롤러, 그리고 모터를 포함한 파워트레인의 시스템 구성도이다.

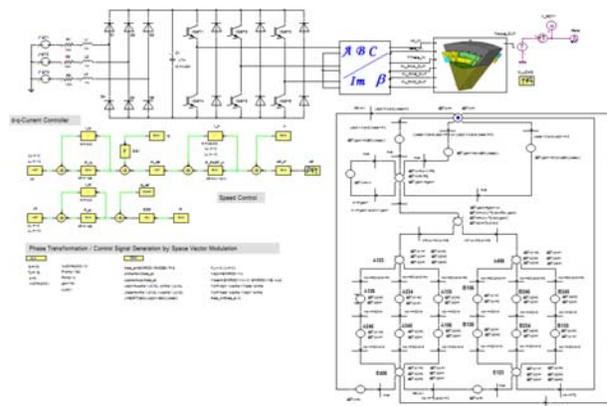


그림 8 파워트레인 시스템 구성도

3.1 인버터 시뮬레이션

배터리에서 LISN(Line Impedance Stabilization Network) 단을 거쳐서 온 직류를 모터 입력을 위해 교류로 바꾸는 과정이 인버터의 역할이다. 전기 자동차의 인버터는 고전력용이기 때문에 보통의 MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)가 아닌 IGBT(Insulated Gate Bipolar mode Transistor) 모듈로 이루어져 있다. IGBT의 특징은 고속으로 스위칭할 수 있으며 고전력 용으로 적합하다. 하지만, 이 IGBT가 스위칭할 때마다 partial inductance의 영향으로 스위칭 노이즈가 외부로 방출하게 된다. 이것이 바로 EMC 중 하나인 EMI(Electro Magnetic Interference)의 원인이 되고 있다.

그림 9는 3D IGBT module에서 Turn-on과 Turn-off 할 때의 전압과 전류 파형을 ANSYS사의 Q3D Extractor와 Simplorer를 이용한 시뮬레이션 결과와 Turn-off 구간의 측정 결과를 나타낸다 (빨간색의 dot). 두 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 이 결과는 왜 인버터 회로에서 EMI가 발생하는지를 나타내는 이유가 된다.⁴⁾

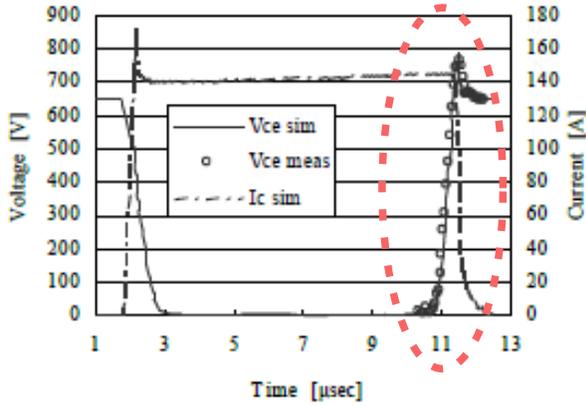


그림 9 Turn-off 동안의 인버터 회로에서 IGBT의 다이내믹 특성을 측정된 결과와 시뮬레이션 결과의 비교

또한, 전력을 전송하는 Busbar 역시 EMI를 발생시키기 때문에 그림 10과 같이 IGBT 3D 모델과 Busbar 3D 모델을 포함한 인버터 시스템을 해석해야만 한다.

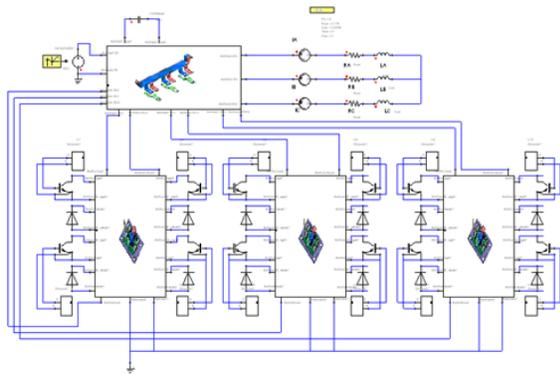


그림 10 IGBT 3D 모델과 Busbar 3D 모델을 포함한 인버터 회로도

3.2 모터와 모터 컨트롤러 시뮬레이션

전기자동차의 트랙션 모터로 많이 사용되는 것이 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)인데, 동작 범위가 다른 모터에 비해 넓고, 릴럭턴스 토크까지 이용함으로써 고효율, 고토크가 가능하다는 장점이 있다. 이 모터의 Phasor Diagram 과 대표적인 로터 형상은 그림 11과 같다.

모터 설계를 위해서 효율맵을 구하는 것이 매우 중요한 요소이다. 이 효율을 구하기 위해서는 모터에서 소모되는 각종 손실들을 정확히 예측할 필요가 있다. 식(1)은 모터 효율 η 를 나타내는 수식으로 입력 파워와 출력파워의 백분율로 나타낸다.

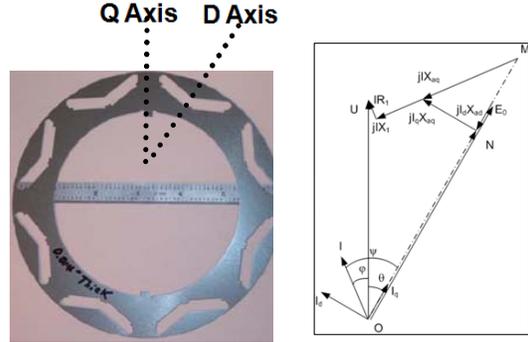


그림 11 IPMSM 로터 형상 및 Phasor Diagram

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \tag{1}$$

여기서, Output Mechanical Power 인 P_2 는 식(2)로부터 구해진다.

$$P_2 = P_1 - (P_{fw} + P_{Cua} + P_{Fe} + P_{PM}) \tag{2}$$

입력파워인 P_1 은 식(3)과 같이 3상의 전류와 전압과 Q축과 D축의 각도로 구해진다.

$$P_1 = 3UI\cos\phi \tag{3}$$

또한, 식(2)의 각 손실은 마찰손과 풍손에 해당하는 P_{fw} , 권선의 동손인 P_{Cua} , 전기 강판의 철손인 P_{Fe} , 그리고 영구자석이 도전율이 있기 때문에 발생하는 영구자석의 와전류손 P_{PM} 이 있다.

이 손실을 계산하기 위하여 transient 해석을 하고, 그 결과가 그림 12와 같다.

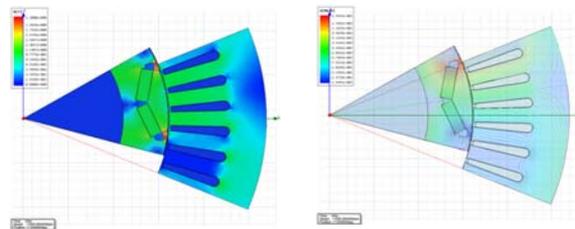


그림 12 자속밀도분포와 자속선 분포

이 트랙션 모터의 손실을 정확히 예측하고, 이를 줄이기 위해서는 영구 자석을 길이방향에서 잘라야 하고, 코깁 토크를 최소화하도록 모터의 형상을 최적화해야 하며, 철손 계산을 정확하게 하기 위해서 강판의 주파수별 BP curve 들을 고주파 성분까지 입력해야 한다. 이렇게 손실을 모두 고려하여 계산

된 효율맵이 그림 13과 같이 얻어진다.

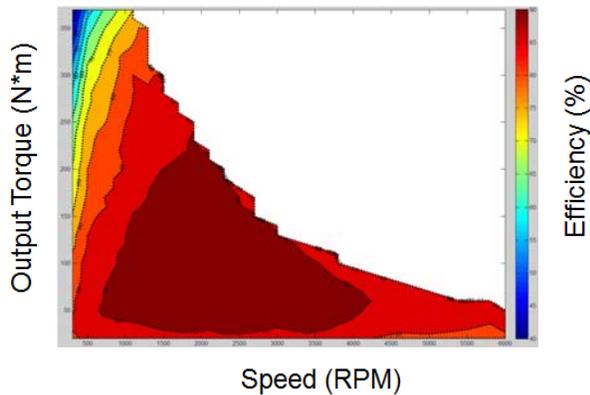


그림 13 IPMSM 효율 맵

이렇게 모터가 설계되는 동안 모터 컨트롤러도 같이 설계되어야 한다. 벡터 컨트롤 모듈레이션을 먼저 설정하여 인버터의 스위칭 순서를 정하고, 제어를 위해 3상에서 2상, 그리고 단상으로 변화시키는 상변화 알고리즘, 속도위치전류제어를 위한 제어기의 게인 값을 설정해야 한다. 또한, IGBT 인버터의 데드 타임을 설정하고, 최대 토크를 얻기 위한 MTPA (Maximum Torque per Ampere) 제어와 약계자 제어 (Field Weakening Control) 를 순차적으로 설계해야 한다. 이 제어회로와 전자장 시뮬레이터인 Maxwell 모델을 포함하여 전체 모터 드라이브 시스템을 해석해야 한다. (그림 8 참조)

모터 설계에 있어서, 전자장 해석과 함께 열해석을 연성하여 전자장 손실에 의한 발열을 해석해야 하며 이 발열에 의한 모터의 성능 저하에 대한 해석도 병행되어야 한다. 또한, 전자장에 의한 편심과 소음 및 진동 또한 중요한 요소가 된다. 이를 위해서는 전자장-열-구조 해석을 연성 해석할 수 있는 소프트웨어 플랫폼이 필요하다.

4. 결 론

전기자동차용 파워트레인 시스템을 해석하기 위한 방안들을 살펴보았다.

배터리 해석을 위해서는 열유동 해석 툴과 시스템 시뮬레이션 툴, 그리고 구조해석을 위한 툴이 필요하다. 이는 ANSYS사의 Fluent, Mechanical 그리고 Simplorer와 같은 툴이 필요하다는 의미이다.

파워트레인의 인버터 해석을 위해서는 partial inductance 를 포함한 RLCG 값을 주파수 별로 추

출할 수 있는 Q3D Extractor와 같은 툴과 이를 회로로 꾸밀 수 있는 Simplorer가 필요하다. 본 원고에서는 언급하지 않았지만, 열적 문제까지 감안해서 인버터 문제를 해결해야 한다면 전기전자 발열 해석 전용툴인 IcePak과 Simplorer가 필요하게 된다.

모터 및 모터 컨트롤러 해석을 위해서는 모터 설계에 필요한 Maxwell, 컨트롤러 회로를 꾸미기 위해 필요한 Simplorer, 그리고 모터의 열해석을 위한 Fluent, 구조해석 및 소음해석을 위해서는 Mechanical 툴이 필요하다.

그림 14는 이를 위한 전체 시뮬레이션 소프트웨어들의 관계를 나타낸다.

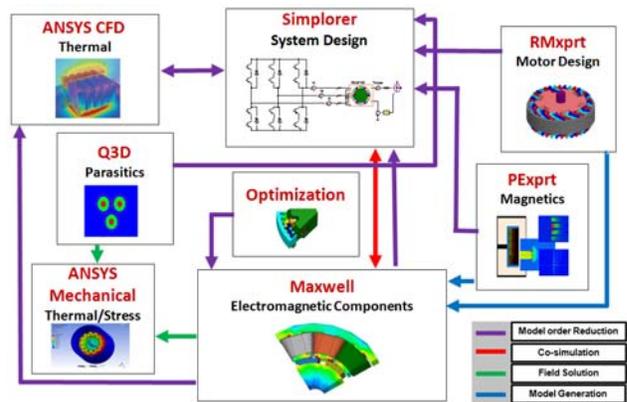


그림 14 파워트레인 시뮬레이션을 위한 ANSYS 사의 소프트웨어 관계도

전기자동차 개발 시대가 열리면서 과거에 고민하지 않아도 되는 사항들이 가장 큰 이슈거리가 되고 있다. 배터리나 인버터, 모터 뿐 아니라 각종 ECU (Electronic Control Unit) 보드들과 200종이 넘는 센서 등 전기전자 솔루션이 자동차 한 대에 차지하는 비율이 일반 내연기관 자동차보다 60% 이상 증가된다. 따라서 ANSYS사의 제품과 같은 CAE 툴의 사용이 어느 때보다 요구되고 있으며 단품해석뿐 아니라 시스템 레벨의 해석, 그리고 전자장-열-유동까지 아우르는 연성해석까지 요구되고 있다. 이처럼 전기자동차에서 CAE 활용 방안이 크게 대두되고 있다. 이는 자동차 원가의 40~50% 를 차지하는 배터리, 인버터가 27%, 컨버터가 7%, 게다가 20%를 차지하는 모터까지 더해지면 전기자동차에서 차지하는 원가가 거의 90%가 넘게 된다. 따라서, 전기자동차의 원가 절감과 유지보수 비용의 절감, 운전자의 만족도 향상, 자동차 신뢰성 보장 등을 달성하기 위해 CAE를 적극 활용해야만 한다.

참고문헌

- 1) 이미혜, “전기자동차 시장 현황 및 전망”, Vol. 2011-01 (2011.12.5), 한국수출입은행
- 2) X. Hu, S. Lin, S. Stanton, W. Lian, “A Novel Thermal Model for HEV/EV Battery Modeling Based on CFD Calculation” IEEE Energy Conversion Congress and Expo, Atlanta, Sep 12-16, 2010
- 3) X. Hu, S. Lin, S. Stanton, W. Lian, “A State Space Thermal Model for HEV/EV Battery Modeling”, SAE 2011-01-1364
- 4) Takashi Kojima* et al., “Novel Electro - Thermal Coupling Simulation Technique for

Dynamic Analysis of HV (Hybrid Vehicle) Inverter”, 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference / June 18 - 22, 2006, Jeju, Korea

[저자 소개]

한은실

Email : ehan@tsne.co.kr

Tel : 02-2117-0053

1965년 7월 21일생.

1990년 숭실대학교 전자공학과
박사과정 졸업.

현재, (주)태성에스엔이 이사.

