

모델기반 해석을 이용한 전기 이륜차의 동력 특성

김병우^{1*}

¹울산대학교 전기공학부

Power characteristics of motorcycle using model based simulation

Byeong-Woo Kim^{1*}

¹School of Electrical Engineering, Ulsan University

요 약 본 논문에서는 ASM을 이용하여 전기 이륜차 장치에 대한 모델기반 설계 기법을 제시하였다. 실제, 전기 이륜차의 시제품 제작 이전에 전기 이륜차의 최적화와 동력을 예측하기 위해서는 신뢰성을 갖는 해석이 필요하다. 과거의 전기 이륜차 연구는 미시적 관점보다는 거시적 관점에서 실시되었다. 그러나, 본 연구에서는 전기 이륜차 핵심 부품에 대한 상세 해석을 실시하였다. 본 논문에서는 이론과 실험해석의 에러 비율이 2.3%에 달하는 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 이 같은 상세 해석을 통하여, 전기 이륜차의 해석 정확도를 향상시키고 설계인자 해석이 가능하게 되었다. 또한, 본 연구에서는 전기 이륜차가 직면하고 있는 Fail safety에 대한 효과적 방법을 제시하였다.

Abstract In this paper, we propose that a model based design for an electric motor cycle system using Automotive Simulation Models. Before prototyping a realistic electric motorcycle, a reliable simulation program is required to test the capacities of the power sources and optimize the parameters of an electric motorcycle. In the past, The research of electric motorcycle was conducted at macro rather than micro level. However, this research suggests the detailed analysis method of specific key components. This paper can get a good error ratio, 2.3%, as a consequence of the interpretation of experiment and simulation. With the analysis of specific electric motorcycle, it is able to analyze design factor and improve accuracy of electric motorcycle interpretation. Also, this research suggests the effective way to get fail safety so that it can solve the fail which can be encountered in electric motorcycle.

Key Words : Automotive Simulation Models, Electric Motorcycle, Fail Safety, Model based Design

1. 서론

지구환경과 에너지 문제가 심화되면서 이륜차를 포함한 내연기관의 문제가 심각해지고 있다. 특히, 내연기관 기반의 전기 이륜차는 일반 자동차의 공해 배출이 10배 정도로서 대기오염의 주범으로 인식되고 있다. 이 같은 내연기관 기반의 이륜차 공해문제를 해결하기 위해서는 자동차에 적용되고 있는 기술과 제품을 적용할 수 있으나 일부 대형 이륜차를 제외하고 일반 소형 이륜차는 공

간 및 경제성 측면에서 비현실적인 접근방법이다.

최근, 내연기관 기반의 이륜차의 공해를 근본적으로 해결하기 위하여 전기 구동 이륜차의 연구가 활발해지고 있다. 전기 구동 이륜차의 상용화를 위해서는 내연기관 기반의 이륜차에 근접하는 성능구현과 전동 시스템으로 구동되는 특성 때문에 전기장치에 대한 Fail safety 확보 방안이 중요하다. 전기 구동 이륜차의 일반 성능과 안전성 확보를 위해서는 대상 시스템에 대한 정확한 모델링 및 해석이 요구된다. 전기 구동 이륜차는 엔진으로 대

본 논문은 울산대학교 전기공학부 학부 일류화 지원 사업 일환으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Byeong-Woo Kim(Ulsan Univ.)

Tel: +82-10-3413-6018 email: bywokim@ulsan.ac.kr

Received August 14, 2013

Revised (1st September 6, 2013, 2nd October 9, 2013)

Accepted October 10, 2013

표되는 내연기관 이륜차에 비하여 구성 부품이 다양하다. 전기 구동 이륜차는 크게 배터리, 전력변환장치, 전동기 로 구분할 수 있다.

전기 구동 이륜차관련 연구는 개발 역사가 일천하기 때문에 경험적인 노하우에 의존하여 실시되고 있다[1]. 이 같이 경험적인 노하우에 의하여 실시된 연구는 연구 기간 증대 및 체계적인 개발의 장애요인으로 작용하게 될 것이다. 일부 전기 자동차에 대하여 체계적인 구성 부품의 모델링과 해석을 실시하여 연구를 진행하였으나 대상 모델링이 세부적이지 못하고 포괄적이기 때문에 정확한 성능해석이 어려웠다[2,3].

또한, 전기 이륜차의 상용화 가능성을 증대시키기 위해서는 고전압 기반의 전장 부품 및 시스템에 대한 Fail safety 에 대한 연구가 필요하나 국내에서는 전무한 실정이다. 일부, 전기 자동차, 하이브리드 자동차에서 이에 대한 기초 연구를 진행하였을 뿐이다[4,5]. 따라서, 본 연구에서는 전기 이륜차를 구성하고 있는 배터리 중심의 핵심 부품을 모델 기반으로 모델링하고 정량적으로 해석할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 또한, 본 연구에서 구축한 전기 이륜차 시스템 모델을 활용하여 배터리에서 발생할 수 있는 결함에 대응 가능한 Fail safety 확보 방안을 제시하고자 한다.

2. 전기 이륜차 시스템 설계 및 모델링

2.1 전기 이륜차 시스템 설계

본 연구에서 해석하고자 하는 전기 이륜차는 기존 내연기관 기반 이륜차의 동력을 얻기 위하여 Fig. 1과 같이 전동 모터 및 변속모듈, 인버터, 에너지저장 모듈(배터리 & BMS), 통합제어기로 구성하였다.



[Fig. 1] Components of electric motorcycle

모터 구동을 기반으로 하는 전기 이륜차는 기존 110cc 내연기관 이륜차의 동력 특성을 유사하게 얻어야 하기 때문에 Table 1과 같은 목표 사양을 설정하였다. 본 전기 이륜차는 국내 산악지형에 적합하도록 하기 위하여 30% 경사에서 14Km/hr, 최대 부하 285Kgf 가 가능하도록 하였다. 특히, 전기 이륜차의 핵심 부품이라 할 수 있는 충전장치는 충전 편의성을 위하여 On board charger를 적용하였고 배터리는 리튬 폴리머 팩으로 구성하였다. 전동 모터는 전기 이륜차의 내구성 및 순간 기동성 향상을 위한 2단 변속기 내장형 PMSM In-wheel 모터 구동모듈을 적용하였다.

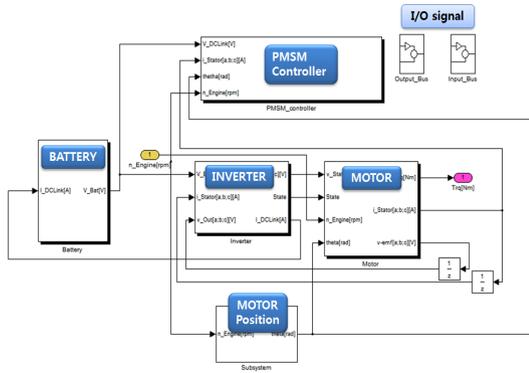
[Table 1] Design parameters of electric motorcycle

Parameter	Value	Unit
Maximum rating speed	80	km/h
Cruising range (Constant 50km/h)	70	km
Gradeability (Slope 30%)	14	km/h
CVS 40	90	km
Nominal voltage	73	V
Maximum weight	285	kg _r
Wheel size	576	mm

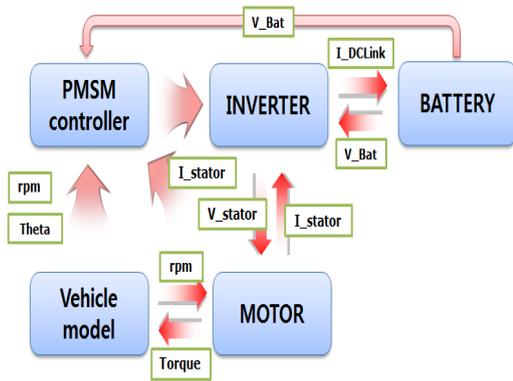
또한, Table 1에서 설정한 목표 사양의 달성 여부를 정량적으로 판단 할 수 있도록 국내 내연기관 차량평가기준으로 주로 사용하는 CVS 40모드를 활용하였다. 최고 주행속도는 국내 시내도로 주행 속도인 80km/h로 설정, 1충전 주행거리는 50km/h 정속 주행 시 70km로 설정하였다.

2.2 전기 이륜차 핵심 부품 모델링

본 연구 대상인 전기 이륜차의 부품 모델링을 위해서 ASM에서 지원하는 모델 기반의 수학적 모델링을 실시하였다. ASM(Automotive Simulation Model) 프로그램은 리튬이온 배터리, 전동 모터(DC, BLDC, PMSM), 인버터, 컨트롤러, 다양한 보조 장치에 대한 상세 모델링 수행이 가능하다. 본 논문에서는 전기 이륜차 핵심 부품 중 가장 중요한 모터와 배터리 모델을 중점적으로 다루었다.



[Fig. 2] Components model of electric motor cycle



[Fig. 3] Flow chart of control logic

본 연구에서는 전기 이륜차를 구성하고 있는 5개의 핵심 부품을 모델링하였는데, 이 중에서 배터리에 대한 모델링 방법을 세부적으로 설명하고자 한다. 왜냐하면, 본 연구에서는 일반적인 전기 이륜차 동특성을 기본으로 하되 배터리 결함으로 인한 Fail safety 기능을 검증하였기 때문이다.

배터리는 ASM에서 제공하는 Multi-cell model을 사용하였다. Multi-cell model은 최대 500개의 셀의 직렬연결이 가능하고 각각의 셀의 전압을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 최소 셀 전압 3.5V에서 최대 셀 전압 4.15V의 리튬 폴리머 배터리로 설계하였다. 팩 구성은 셀 20개를 직렬 연결하였고 총 2개의 팩을 병렬로 연결하였다.

Fig. 4는 배터리 구성 요소 부품을 모델링한 것이고 Fig. 5는 배터리 팩 모듈의 제어 로직을 표현한 것이다. 배터리 모델은 크게 배터리 전압과 부하전류, SOC를 계산하는 Battery cell model과 열 발생과 열손실을 계산하는 터미널 전압 모델, 배터리 레퍼런스 전압과 비교하여 각 셀의 전압차이를 계산하는 Delta model로 나눌 수 있

다. 터미널 전압 모델의 경우, 모터에서 요구하는 전류와 Thermal model에서 계산된 배터리 온도를 변수로 식 (1)을 활용하여 배터리 셀의 전압, 손실전압, 저항을 계산하였다.

$$V_{Bat} = V_{Bat,0} - V_{Loss} \quad (1)$$

$$V_{Bat,0} = n_{cell} V_{cell}(SOC) \quad (2)$$

$$V_{Loss} = \frac{1}{C_{DL}} \int (I_{Bat} - \frac{V_{CDL}}{R_{DL}}) + \frac{1}{C_{DL}} \int (I_{Bat} - \frac{V_{CDff}}{R_{Dff}}) + I_{Bat} R_{Bat}(SOC, I_{Bat}, T_{Bat}) + \frac{dI_{Bat}}{dt} L_{Bat} \quad (3)$$

where V_{Bat} : Battery terminal voltage
 $V_{Bat,0}$: Balanced voltage
 V_{Loss} : Loss voltage

Thermal model의 경우 식 (4)을 통해서 배터리의 열 발생과 열손실을 계산하여 현재 배터리 온도를 계산할 수 있다. 열 발생은 배터리 전류와 손실전압에 대한 내부 손실과 배터리의 화학 반응, 배터리 내 가스 발생으로 인한 손실반응에 의해 발생한다.

또한, 열손실은 열복사에 의해 일어나며 총 열 발생에서 열손실을 감하여 Pw를 계산할 수 있다. Thermal model에서 계산한 배터리 온도 값은 터미널 전압 계산의 변수로 사용한다.

$$T_{Bat} = T_{Bat,0} + \frac{1}{C_{Bat} m_{Bat}} \int P_w dt \quad (4)$$

where C_{Bat} : Heat capacity
 m_{Bat} : Battery mass

SOC 계산 로직의 경우 식 (5)을 활용하여 부하전류 로직에서 계산된 손실전류와 충전 혹은 방전 시 배터리 전류를 변수로 하여 계산한다. 배터리 전류와 손실전류의 차이가 0보다 크면 부하전류는 충전상태이며 0보다 작으면 부하 전류는 방전상태를 나타낸다.

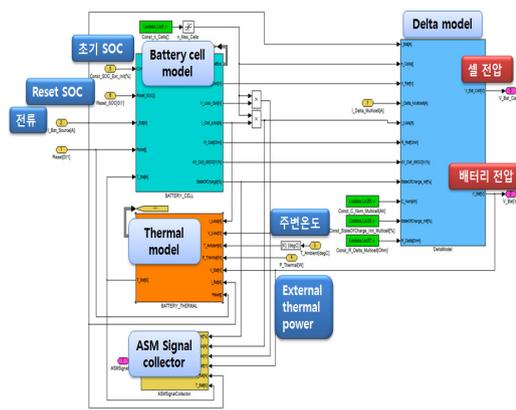
$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{K_N} \int (I_{Terminal} - I_{Loss}) dt \quad (5)$$

where K_N : Nominal capacity of battery

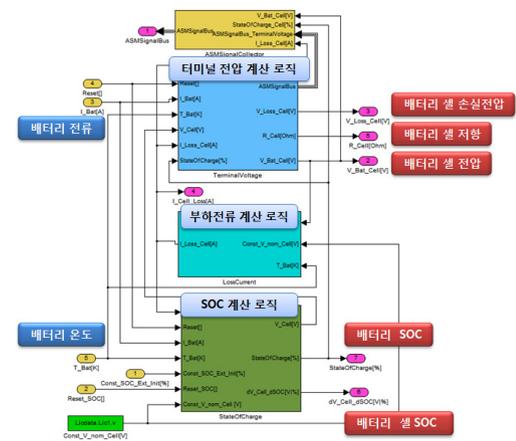
리튬 폴리머 배터리의 경우 20% 이상 과다 방전은 배

터리 수명에 악영향을 미치므로 전압 사용범위를 SOC 20%에 해당하는 3.5V로 제한하였다.

50km/h 정속 주행 시 주행거리 70km를 달성하기 위해서는 총 84분을 주행할 수 있어야 한다. 50km/h정속 기준 배터리 전류는 20A로 SOC 100%에서 20%까지의 사용 범위와 방전특성을 감안하여 배터리 용량은 총 40Ah로 설정하였다.



[Fig. 4] Core component model of battery pack

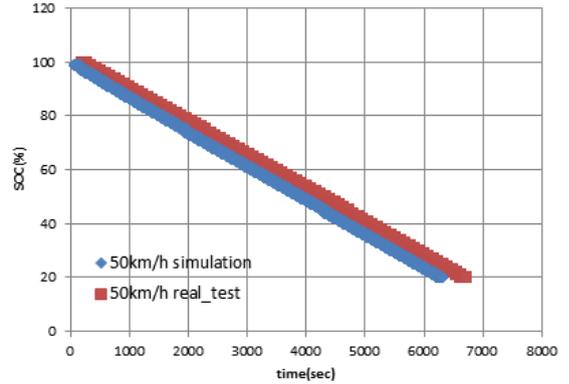


[Fig. 5] Logic structure of battery model

3. 이륜차 주행 특성 해석

전기 이륜차 주행 특성을 해석하기 위하여 앞서 실시한 배터리 중심의 핵심 부품 모델링과 이륜차 동특성 해석을 위한 Bikesim 해석 프로그램을 연계하였다. 먼저, 주행 속도를 50km/hr 조건에서 배터리의 SOC 조건에 따른 주행거리를 해석하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 일

반적으로 사용되는 SOC가 20%에서 80% 범위에서 전압 강하를 확인 후 주행가능 거리를 측정하였다. 이 때, 배터리 방전 전류가 약 20A로 일정하게 방출되며 총 이동 거리는 91.67km이다. 이 값은 실차 테스트 결과 값인 87.50km와 근접한 결과를 나타낸다.



[Fig. 6] Graph of SOC - time at 50km/h constant speed test

이륜차의 등판능력은 Fig. 7과 같이, 10%, 20%, 30% 경사로에서의 최대 속도 값을 측정하였다. Table 4는 시뮬레이션과 실차 테스트 결과이다. 시뮬레이션 결과 값이 실차 테스트 결과 값 보다 약간 높게 측정되었다. 이는 실차 테스트의 경우 10%, 20%, 30%에 정확하게 맞는 구배가 아니라 이에 근접한 구배의 등판로를 사용했기 때문이라 판단된다.

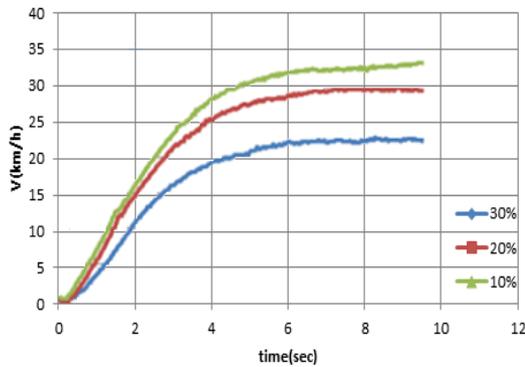
도심 주행모드인 CVS 40 주행 모드는 전기 이륜차가 Fig. 10과 같이 가 감속을 반복하는 테스트 주행 모드이며 평균 차속은 18.35km/h, 최고 속도 50km/h, 주행시간 195초/회, 주행거리 1.013km/회로 구성되어 있다. 설계한 핵심 부품 모델을 시뮬레이션하여 CVS 40 주행 모드에 적용한 결과, 총 이동가능 거리는 91.96km를 얻었다. CVS 40 주행모드에 기초한 실차 테스트 결과 값은 89.8km로 비슷한 결과를 나타냈다.

[Table 2] Distance of 50km/h constant speed test.

Item	Simulation	Vehicle test	Driving time
50km/h	70.5km	71.0km	86min

[Table 3] Speed of 10%,20%,30% climbing test

	10%	20%	30%
Simulation	34.8km/h	30km/h	23.2km/h
Real test	34.7km/h	28.4km/h	21.7km/h



[Fig. 7] Graph of climbing simulation test

4. SOC관련 Fail safety 특성 연구

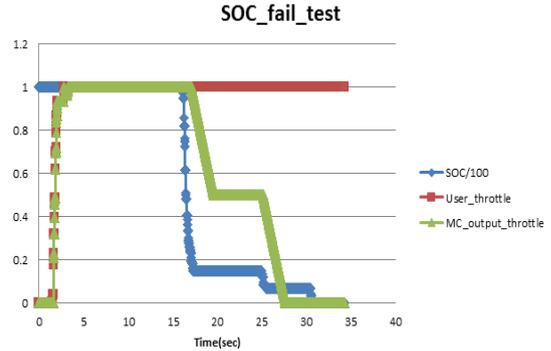
본 연구에서 적용한 에너지저장장치는 리튬 폴리머 배터리를 사용하고 있다. 주지의 사실이지만, 리튬 폴리머 배터리는 충전 상태(SOC)가 10% 이하로 떨어지게 되면 배터리 자체에 화학적 손상을 발생시키고 이로 인한 내구성능 저하를 유발하게 된다. 또한, 전기 이륜차에 배터리 충전 상태가 기준 이하로 발생하게 되면 최악의 경우 폭발 위험성이 존재하게 된다.

따라서 본 연구에서는 리튬 폴리머 배터리의 SOC 상태 변화에 따른 전기 이륜차 안전성 확보 방법을 해석하였다. 이를 구현하기 위하여, 전기 이륜차의 통합 제어기는 리튬 폴리머 배터리의 SOC가 20% 이하가 될 경우에 가속 신호가 1(최고 가속 신호)이 되더라도 출력 신호를 0.5로 처리하였다. 또한, 배터리 SOC 상태를 한 단계가 아닌 다 단계로 운영하여 이륜차 안전성을 도모하도록 하였다.

이를 통하여, 전기 이륜차 충전장치의 안전을 확보하고 이륜차 자체의 주행거리를 확보하고자 하였다. 상기 조건의 타당성을 차량 동력학적으로 검증하기 위하여 세부적으로 배터리 SOC에 따른 이륜차 주행 안전성을 정량적으로 해석하였다. 이륜차 배터리의 SOC 값이 10% 이하로 강하되어 가속 신호를 0으로 처리하였을 때, 직진 상태의 이륜차 거동을 해석하였다. 또한, 이륜차 가속모드가 0이 되어 코너링을 할 경우에 배터리 SOC 50% 제어와 이를 실시하지 않을 때에 이륜차 주행 안정성을 비교평가하였다.

아래 Fig. 8은 이륜차 배터리 SOC가 위험 및 Fail 상태가 되었을 때, 이륜차 제어 모드를 나타낸 것이다. 이륜차 운전자의 가속 신호 값이 1로 입력되더라도 배터리 SOC가 30% 밑으로 떨어지는 시점에 통합 제어기는 가속 신

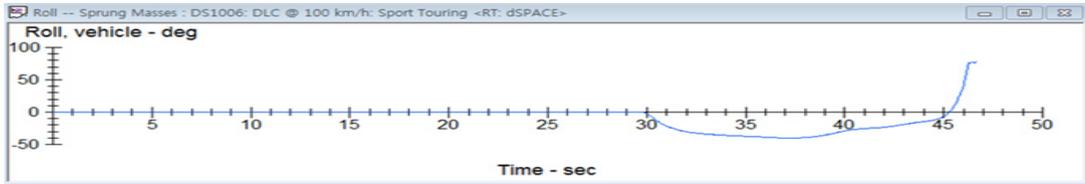
호를 0.5로 제한시킨다. 또한, 이륜차 배터리 SOC가 20%로 떨어질 경우에는 가속 신호 값을 0으로 처리함을 알 수 있다.



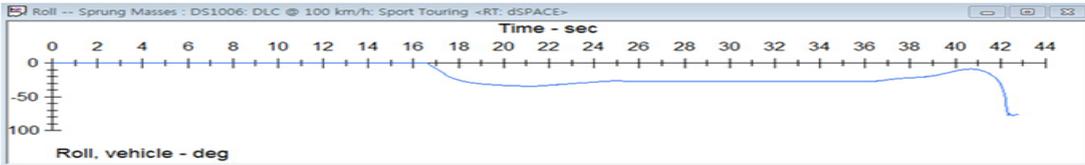
[Fig. 8] Control Characteristics according to SOC ratio

Fig. 9는 이륜차 배터리의 SOC가 10% 이하로 되었을 경우, 이륜차 운전자의 가속 신호 1에 대하여 a) 동력을 100% 차단한 경우, b) 동력을 50% 차단한 경우로 구분하여 이륜차의 롤 오버(Roll over) 특성을 해석한 것이다. 이륜차에 인가되는 동력을 100% 차단한 경우에는 15초 동안에 최대 롤 오버 값이 -400에 달하였다. 이와 달리, 운전자의 가속 인가 신호대비 동력을 50% 차단한 경우에는 롤 오버 값이 100% 차단한 경우보다 약간 적게 발생되고 지속 시간은 25초 발생됨을 확인하였다. 따라서 특정 순간에 동력을 100% 차단하지 않고 단계적으로 차단함으로써 이륜차 시스템의 배터리 결함에 의한 문제를 일부 해결할 수 있을 것이다.

Fig. 10는 이륜차 배터리의 SOC가 10% 이하로 되었을 때에 Fig. 9과 같은 조건에서 이륜차의 코너링 특성을 나타낸 것이다. 이륜차에 인가되는 동력을 100% 차단한 경우에는 코너링시의 주행거리가 110m로 나타났고 50%로 차단한 경우에는 200m로 나타났다. 이를 통하여, 이륜차 배터리의 긴급 SOC 상태에서 이륜차의 긴급 회피와 같은 안전조치 및 배터리 자체의 안전성 확보 가능성을 정량적으로 해석할 수 있었다. 따라서, 상기와 같이 전기 이륜차의 위험상태에서 단계적으로 동력을 차단하게 되면 전기 이륜차의 안전 확보에 기여할 수 있을 것이다.

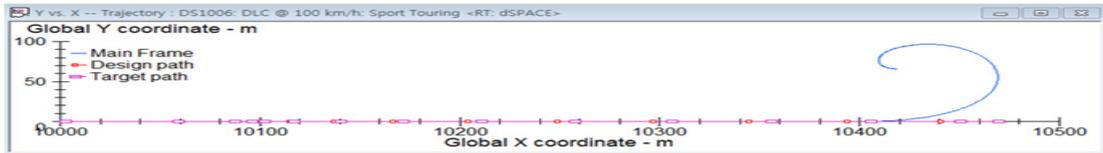


a. Case of power 100% cutoff

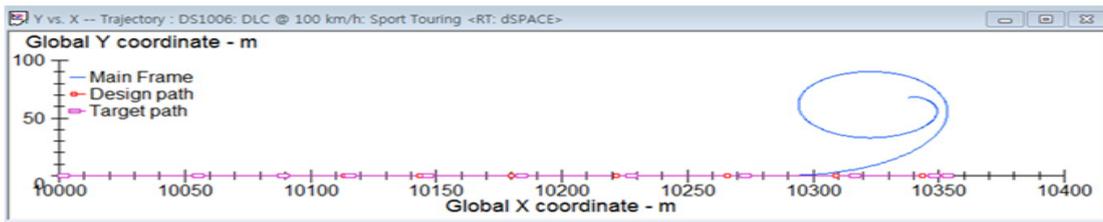


b. Case of power 50% cutoff

[Fig. 9] Variation characteristics of roll rate

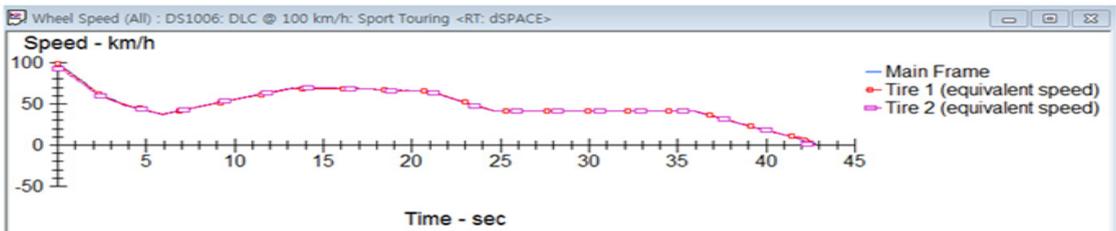
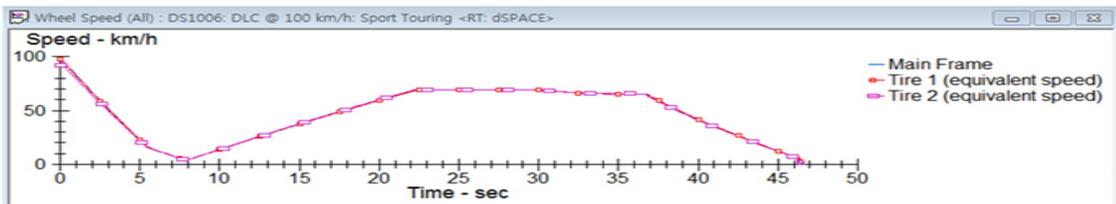


a. Case of power 100% cutoff



b. Case of power 50% cutoff

[Fig. 10] Variation characteristics of Cornering path



[Fig. 11] Characteristics of speed variation on motorcycle

5. 결론

본 연구에서는 기존 내연기관대비 공해와 연비 특성이 우수한 전기 이륜차 핵심 부품의 수학적 모델링과 특성 해석을 실시하였다. 본 연구에서는 기존에 실시하였던 시스템 관점의 거시적 해석 및 평가를 지양하고 핵심 부품을 수학적으로 세부적으로 해석을 실시하여 이륜차 시스템에서 특정 부품이 미치는 영향을 정확하게 평가할 수 있도록 하였다.

이 같은 이륜차 핵심 부품을 기반으로 하여 이륜차 평가모드 CVS 40 주행모드를 적용한 결과, 전체 주행거리는 91.86Km를 나타냈다. 이를 실제 주행실험과 비교한 결과, 실제와 이론해석 결과의 오차가 2.3%로 양호한 결과를 나타냈다. 또한, 기존 전기 이륜차의 고질적인 문제점인 등판능력에서도 30%까지 가능하였기 때문에 국내 산악 지형에 적합한 전기 이륜차의 상용화 가능성을 검증하였다. 따라서 실제 전기 이륜차를 제작하여 평가하였던 과거 방식을 탈피하여 해석적으로 이륜차 성능을 예측할 수 있는 방법을 제시하여 개발기간 및 비용저감에 기여할 수 있을 것이다.

References

- [1] C. Meifen, and J. Egashira, "High Efficiency Control of IPMSM for Electric Motorcycles", Power Electronics and Motion Control Conference, pp.1893-1897, 2009
- [2] B. S. Kil "The Analysis of a Electric Scooter's Performance through Motor and Battery Capacity Changing," Annual Conference Proceedings, KSAE, A0533, 2009.
- [3] J. K. Choi, "A Study on the Power Characteristics Analysis of Electric Motorcycle", The Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.12, No.11, pp.5156-5163, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.11.5156>
- [4] C. S. Hearn, M. C. Lewis, R. C Thompson and R. G. Longoria, "Modeling and Evaluation of a Plug-in Hybrid Fuel Cell Shuttle Bus," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference VPPC '09., pp.221-228, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289846>
- [5] ASM Electric Components Reference Manual, pp.35-42, 51- 57, 2010.

김 병 우(Byeong-Woo Kim)

[정회원]



- 1990년 2월 : 한양대학교 정밀기계공학과 졸업 (석사)
- 2002년 2월 : 한양대학교 정밀기계공학과 (박사)
- 1989년 4월 : 일본 KOSAKA 연구소 초빙 연구원
- 1994년 1월 ~ 2006년 2월 : 자동차부품연구원 전장기술연구센터장
- 2006년 3월 ~ 현재 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 부교수

<관심분야>
전자제어