

연료전지 하이브리드 자동차의 최적 제어

정 춘 화¹⁾ · 박 영 일²⁾ · 임 원 식³⁾ · 차 석 원^{*1)}

서울대학교 기계항공공학부/정밀기계설계공동연구소¹⁾ · 서울과학기술대학교 기계설계자동차 공학부²⁾ ·
서울과학기술대학교 자동차공학과³⁾

Optimal Control of Fuel Cell Hybrid Vehicles

Chunhua Zheng¹⁾ · Yeong-il Park²⁾ · Wonsik Lim³⁾ · Suk Won Cha^{*1)}

¹⁾Department of Mechanical and Aerospace Engineering/SNU-IAMD, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²⁾School of Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
Seoul 139-743, Korea

³⁾Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received 13 April 2011 / Revised 18 June 2011 / Accepted 4 July 2011)

Abstract : Fuel Cell Hybrid Vehicles (FCHVs) have already become the subject of major interest among automotive industry as well as power management strategies of FCHVs, as the fuel economy of FCHVs depends on them. There are several types of power management strategies of FCHVs that have been developed to improve the fuel economy of FCHVs. Among them, optimal control theory is applied to this study. A problem is defined and its objective is to minimize the energy consumption of an FCHV and to find the optimal trajectories of powertrain parameters during driving. Necessary conditions for the optimal control are introduced and the simulation results of constant costate are compared to that of variable costate in order to prove that the variable costate can be replaced with the constant costate.

Key words : Fuel cell hybrid vehicle(연료전지 하이브리드 자동차), Power management strategy(동력관리 전략), Optimal control theory(최적 제어 이론), Necessary condition(필요조건), Costate(코스테이트)

1. 서 론

연료전지 하이브리드 자동차가 자동차 업계의 관심을 받으면서 그에 따른 주행 전략도 화제가 되고 있다. 연료전지 하이브리드 자동차의 연비는 주행 전략에 크게 의존하며 이미 전략에 대한 연구가 많이 진행되고 있는데 최적 제어 이론 기반의 전략,¹⁾ 룰 베이스 전략²⁾ 등을 포함하고 있다.

본 연구에서는 연료전지 하이브리드 자동차의 연료 소모를 최소화하고 동력원들의 동력분배를 최적화하는 문제에 대해 최적 제어 이론을 적용하여 최적 경로를 얻을 수 있는 필요조건을 제시하였다. 또

한 필요조건에서 얻은 코스테이트를 일정한 상수 값으로 대신하였을 때의 시뮬레이션 결과와 필요조건에서 얻은 코스테이트를 그대로 적용하였을 때의 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 결과적으로 이 두 가지 경우의 최적 경로는 코스테이트의 초기 값을 적당하게 조절함으로써 아주 작은 오차로 서로에 근접할 수 있었다. 즉 일정한 코스테이트 값으로 필요조건에서 얻은 코스테이트 경로를 대신할 수 있었다.

2. FCHV와 동력전달계

본 연구에 사용된 차량의 데이터들은 Table 1³⁾과 같고 차량의 동력전달계의 정보는 Table 2와 같다. 배터리를 보조동력원으로 하였고 DC-DC 컨버터의

*Corresponding author, E-mail: swcha@snu.ac.kr

Table 1 Parameters of the vehicle

Item	Value
Vehicle total mass (kg)	1500
Final drive gear efficiency (%)	95
Tire radius (m)	0.29
Aerodynamic drag coefficient	0.37
Vehicle frontal area (m ²)	2.59
Air density (kg/m ³)	1.21
Rolling resistance coefficient	0.014

Table 2 Powertrain parameters

Motor	75 kW
Fuel Cell System (FCS)	45 kW, 242 cells, 280 cm ² /cell
FCS power rate	18 kW/s
Battery	1.5 kWh

효율은 95%로 하였으며 Table 2에서 FCS(Fuel cell system)에 관한 데이터는 기존의 연구⁴⁾를 참조하였다.

2.1 FCS

연료전지 시스템에서 스택의 전류와 연료 즉 수소 소모율의 관계는 다음의 (1) 식¹⁾으로 표현된다.

$$\dot{m}_{h_2} = \frac{N_{cell} \cdot M_{h_2}}{n \cdot F} \cdot I_{stack} \cdot \lambda \quad (1)$$

여기서 N_{cell} 은 셀의 개수를 나타내고 M_{h_2} 은 수소의 물질량을, n 은 반응에 참여하는 전자의 개수를, F 은 패러데이 상수를 그리고 λ 은 더 넣어주는 수소의 비율을 나타낸다.

본 연구에 사용된 45 kW FCS에서 스택의 전류와 FCS의 네트 파워는 Fig. 1에서와 같은 관계를 가진다. 여기서 FCS의 네트 파워는 식 (2)에서와 같이 스택이 공급하는 파워에서 공기 압축기 등 보조 장치들이 소모하는 파워를 뺀 양인데 공기 압축기가 다른 보조 장치에 비해 많은 양의 파워를 소모하므로 본 연구에서는 공기 압축기만 고려하였다.

$$P_{fcs} = P_{stack} - P_{aux} \quad (2)$$

식 (1)와 Fig. 1에서 알 수 있듯이 연료 소모율과 FCS의 네트 파워는 모두 스택의 전류에 따라 변화하는 양이다. 그러므로 이 두 량 사이의 관계도 구할 수 있는데 Fig. 2에서와 같다.

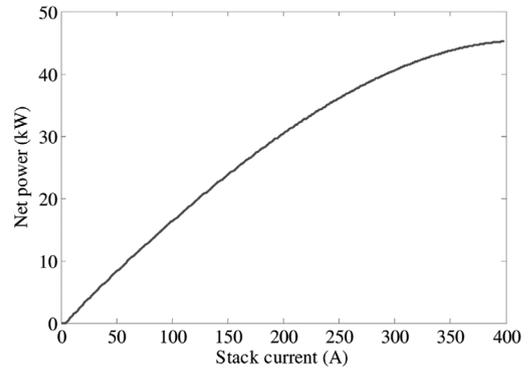


Fig. 1 Stack current and FCS net power

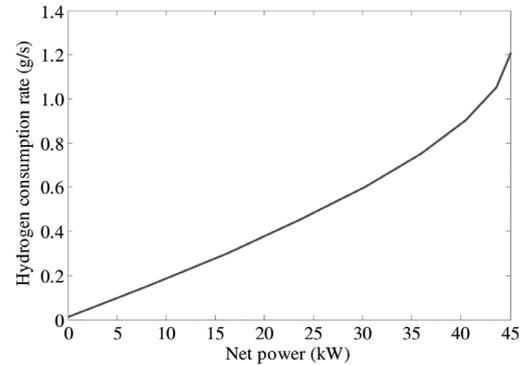


Fig. 2 FCS net power and fuel consumption rate

2.2 배터리

본 연구에서 배터리는 식 (3)⁵⁾와 같이 내부저항 모델을 이용하였다.

$$\dot{SOC} = -\frac{1}{Q_{bat}} \frac{V(SOC) - \sqrt{V(SOC)^2 - 4R(SOC)P_{bat}}}{2R(SOC)} \quad (3)$$

여기서 Q_{bat} 은 배터리 용량을 나타내고 P_{bat} 은 배터리 파워를 나타낸다. 식 (3)에서 볼 수 있듯이 배터리 내부저항 R 와 배터리 Open Circuit Voltage (OCV) V 는 모두 SOC의 함수이다. Fig. 3⁶⁾은 본 연구에 사용된 배터리의 SOC와 R , V 의 관계를 보여준다.

3. 최적 제어 이론과 필요조건

이 부분에서는 최적 제어 이론⁷⁾을 이용하여 주행 과정에 FCS와 배터리의 동력분배를 최적화하고 연료의 소모량을 최소화하는 문제의 필요조건을 제시하였다.

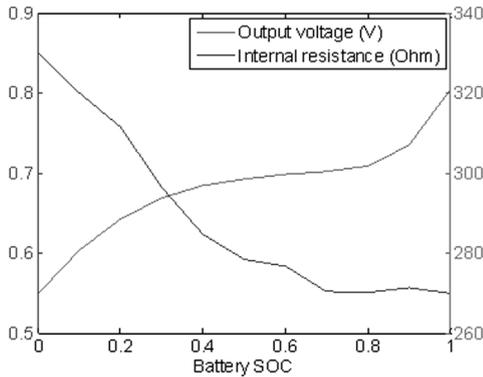


Fig. 3 Battery SOC and internal resistance, OCV

위에서 제기한 문제의 상태 방정식은 이미 식 (3)에서 제시하였다. 여기서 V 와 R 은 모두 SOC의 함수이므로 식 (3)은 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\dot{SOC}(t) = f(SOC(t), P_{bat}(t)) \quad (4)$$

주행사이클이 주어지면 차량에 필요한 파워를 알 수 있기 때문에 다음의 식 (5)가 성립된다.

$$P_{fcs}(t) = P_{req}(t) - P_{bat}(t) \quad (5)$$

여기서 P_{req} 은 차량에 필요한 파워이다. (5)를 이용하여 식 (4)의 배터리 파워를 FCS 파워로 대신하면 다음과 같다.

$$\dot{SOC}(t) = F(SOC(t), P_{fcs}(t)) \quad (6)$$

식 (6)이 바로 위에서 제기한 최적화 문제의 상태방정식이며 SOC 가 상태 변수이고 P_{fcs} 이 제어 변수이다.

위에서 언급했듯이 문제의 목표는 연료 소모량을 최소화하는 것이다. 상태방정식 (6)을 함께 고려하여 식 (7)와 같이 최소화 하려는 Performance measure를 정의하였다.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (\dot{m}_{h_2}(P_{fcs}(t)) + p \cdot (F - \dot{SOC})) dt \quad (7)$$

여기서 연료 소모율과 FCS의 넷트 파워는 Fig. 2와 같은 관계를 가진다.

FCHV의 최소 연료 소모량을 얻을 수 있는 필요 조건은 식 (7)에서 J 의 variation이 0이 되는 조건이다. 식 (7)의 variation을 취하여 그것이 0이 되는 경우를 고려해 보면 다음의 세 식을 만족 시켜야 한다.

$$\frac{\partial H}{\partial p} = \dot{SOC} \quad (8)$$

$$\frac{\partial H}{\partial SOC} = -\dot{p} \quad (9)$$

$$\frac{\partial H}{\partial P_{fcs}} = 0 \quad (10)$$

여기서 H 은 Hamiltonian으로써 다음 식 (11)와 같다.

$$H = \dot{m}_{h_2}(P_{fcs}(t)) + p \cdot F(SOC(t), P_{fcs}(t)) \quad (11)$$

Hamiltonian에서 첫 번째 항은 연료 소모율을 나타내고 두 번째 항은 배터리의 SOC의 변화율을 나타낸다. p 는 코스테이트인데 이는 연료 소모량과 배터리의 전기 소모량 사이의 등가 파라미터이다.⁶⁾

식 (8), (9), (10)이 최적화의 필요조건인데 여기서 식 (9)은 코스테이트 방정식으로 초기 값을 정해줌으로써 코스테이트 p 의 최적 경로를 얻을 수 있다. 식 (10)은 Hamiltonian을 최소화함으로써 제어 변수인 P_{fcs} 즉 FCS의 파워의 최적 경로를 구해준다. 식 (8)은 사실상 위에서 제기된 상태 방정식이다.

Fig. 3에서 보면 배터리 SOC의 사용범위가 일정하다고 할 때 그 사용 범위 내에서 배터리 내부저항과 OCV는 일정하다고 가정할 수 있다. 실제로 플러그인 타입이 아닌 하이브리드 차량용 배터리의 SOC의 사용범위는 제한되어 있으며 대부분의 배터리에서 위의 가정이 성립된다고 할 수 있다. 그러면 상태 방정식 (4)에서 변수는 하나만 되며 다음과 같은 형태를 취한다.

$$\dot{SOC}(t) = f(P_{bat}(t)) \quad (12)$$

또한 식 (6)도 아래와 같은 형태를 취하게 된다.

$$\dot{SOC}(t) = F(P_{fcs}(t)) \quad (13)$$

이렇게 되면 필요조건식 (9)는 아래의 식 (14)와 같은 형태를 취하게 되는데 이는 코스테이트 p 가 일정하다는 것을 의미한다.

$$\frac{\partial H}{\partial SOC} = -\dot{p} = 0 \quad (14)$$

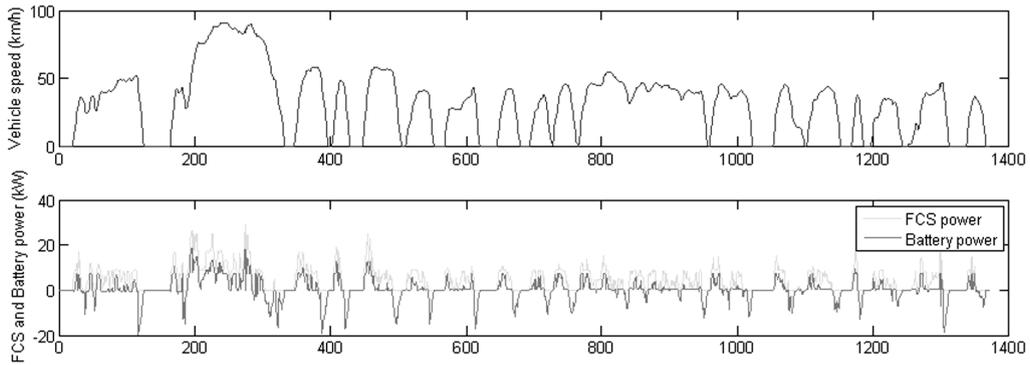


Fig. 4 Optimal power split (variable costate)

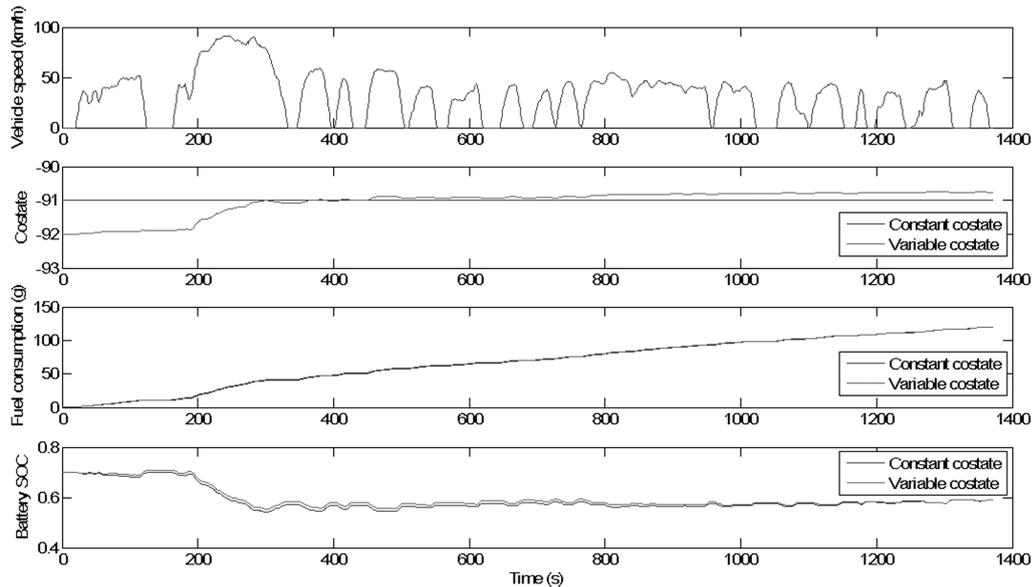


Fig. 5 Simulation results (FTP75 urban)

4. 코스테이트에 따른 최적 제어

이 부분에서는 식 (14)에서 얻은 결론에 근거하여 일정한 코스테이트가 적용된 시뮬레이션 결과를 필요조건식 (9)에서 얻은 코스테이트가 적용된 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 앞에서 제기된 배터리의 내부저항과 OCV가 제한된 SOC 범위 내에서 일정하다는 가정이 성립된다는 것을 증명하였다.

FTP75 urban, NEDC 2000, 그리고 Japan 1015 등 세 가지 주행사이클을 선정하여 시뮬레이션 결과들을 비교하였으며 일정한 코스테이트 값과 식 (9)의

코스테이트의 초기 값은 Table 3과 같이 선정하였는데 여기서 일정한 코스테이트 값이 식 (9)에서 얻은 코스테이트 경로의 평균 값과 근사하게 되도록 선정하였다.

Fig. 4는 FTP75 urban 주행사이클에서 식 (9)의 코스테이트의 초기 값을 -92로 하였을 때의 FCS와 배터리의 동력분배 결과를 보여 준다. Fig. 5, Fig. 6, 그리고 Fig. 7은 각각 FTP75 urban, NEDC 2000, Japan 1015에서 시뮬레이션을 실행한 결과이다. 결과를 관찰해 보면 식 (9)에서 얻은 코스테이트 경로의 변화 범위가 코스테이트 자체 값에 비하면 아주 작다

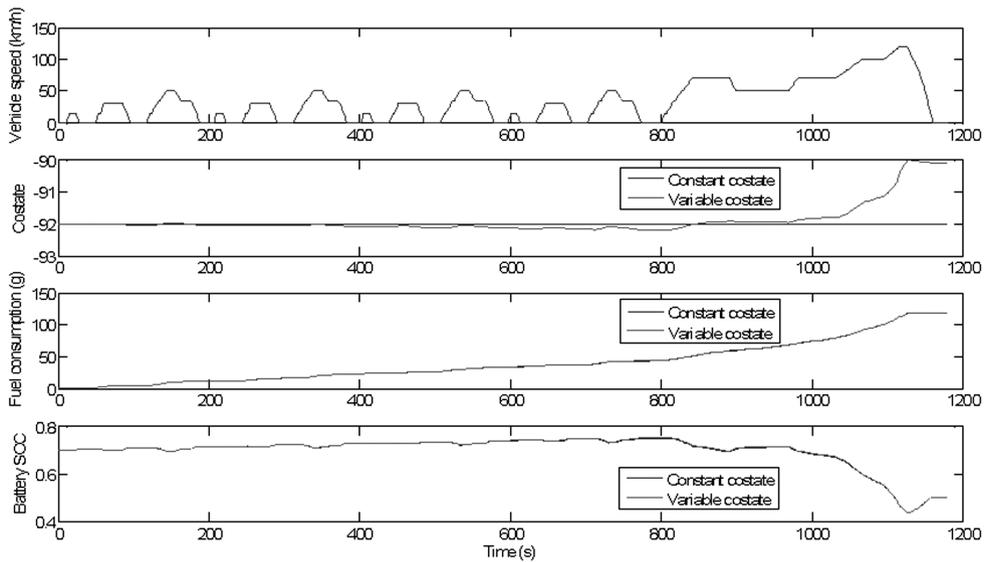


Fig. 6 Simulation results (NEDC 2000)

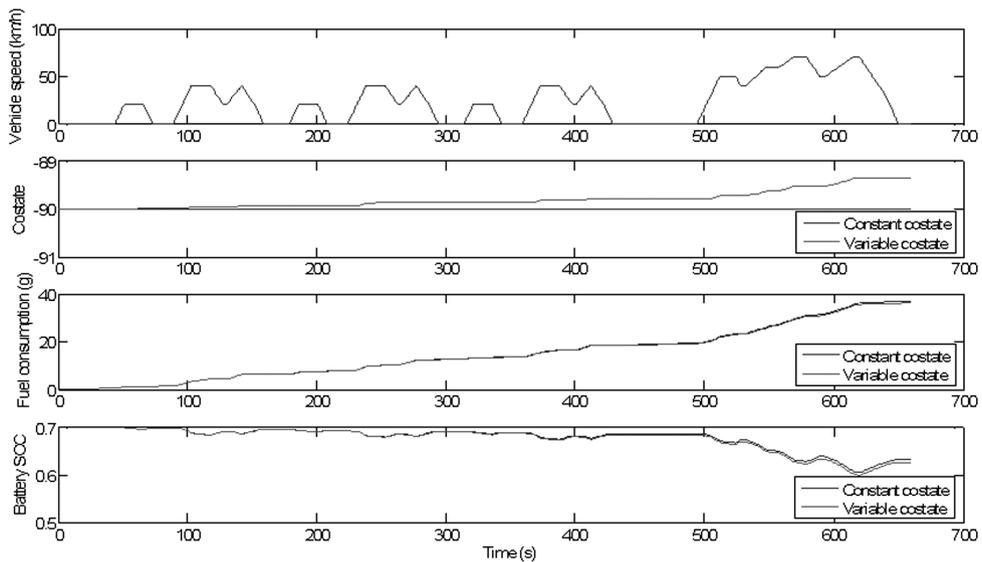


Fig. 7 Simulation results (Japan 1015)

Table 3 Constant costate and initial value of variable costate for three driving cycles

Driving cycle	Constant costate	Initial value of variable costate
FTP75 urban	-91	-92
NEDC 2000	-92	-92
Japan 1015	-90	-90

는 것을 알 수 있다. 또한 두 가지 코스테이트를 사용하였을 때의 전체 연료 소모량과 배터리 SOC의 경로가 거의 근접함을 알 수 있다. 즉 일정한 코스테이트로 식 (9)에서 얻은 코스테이트 경로를 대신할 수 있다. 다만 이는 일정한 코스테이트 값을 정확하게 취해야 한다는 것을 조건으로 한다.

일정한 코스테이트 값으로 코스테이트 경로를 대

신함으로써 주행 중 차량의 제어를 간략화 할 수 있다. 즉 주행 상황에 맞추어 실시간으로 일정한 코스테이트 값을 판단하여 제어를 수행 할 수 있다. 하지만 이 코스테이트 값을 판단하는 것도 하나의 과제인데 교통정보 또는 GPS에 의한 미래 주행 정보와 현재 상황에서의 배터리 SOC 상태 등에 의해 이 값을 판단 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 주행 중에 연료전지 하이브리드 자동차의 연료 소모량을 최소화하는 문제에 대해 최적 제어 이론을 적용하여 이 문제의 필요조건을 제시하였다. 또한 일정한 배터리 SOC 사용 범위 내에서 내부저항과 OCV의 변화가 크지 않다는 가정하에 필요조건 중의 코스테이트가 일정한 값을 가질 수 있다는 것을 제시하였으며 코스테이트를 일정한 값으로 선정하였을 때의 시뮬레이션 결과와 필요조건에서 얻은 코스테이트를 그대로 적용하였을 때의 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 이 두 가지 경우, 전체 연료 소모량과 배터리 SOC의 경로는 코스테이트의 초기 값을 적절하게 조절함으로써 아주 작은 오차로 서로에 근접할 수 있었다. 결과적으로 일정한 코스테이트 값으로 최적 이론에 근거한 필요조건에서 얻은 코스테이트 경로를 대신할 수 있다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2011-0001276)과 지식경제부 산업원천기술개발사업(10033110, HEV/PHEV 시스템 성능 최적화 및 통합제어 원천기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- 1) J. Bernard, S. Delprat, F. Buechi and T. M. Guerra, "Global Optimization in the Power Management of a Fuel Cell Hybrid Vehicle (FCHV)," 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006.
- 2) M. Ehsani, Y. Gao and A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, 2nd Edn., pp.459-469, 2010.
- 3) J. Bernard, S. Delprat, F. N. Büchi and T. Marie Guerra, "Fuel-cell Hybrid Powertrain: Toward Minimization of Hydrogen Consumption," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.58, pp.3168-3176, 2009.
- 4) J. T. Pukrushpan, H. Peng and A. G. Stefanopoulou, "Control-oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems," Transactions of ASME, Vol.126, pp.14-25, 2004.
- 5) N. W. Kim, D. H. Lee, S. W. Cha and H. Peng, "Optimal Control of a Plug-in Hybrid Electric Vehicle(PHEV) Based on Driving Patterns," EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Vehicle Symposium, 2009.
- 6) N. W. Kim, Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle, Ph. D. Dissertation, Seoul National University, Seoul, 2009.
- 7) D. E. Kirk, Optimal Control Theory, Prentice-hall, New York, pp.184-209, 1970.