

병렬형 하이브리드 차량의 동적 구간 제어

전순일* · 김기백** · 조성태* · 박영일*** · 이장무****

Receding Horizon Control of a Parallel Hybrid Electric Vehicle

Soon-il Jeon, Ki-back Kim, Sung-tae Jo, Yeong-il Park and Jang-moo Lee

Key Words : Receding Horizon Control(동적 구간 제어), Hybrid Vehicle(하이브리드 자동차)

Abstract

Fuel-consumption and catalyst-out emissions of a parallel hybrid electric vehicle are affected by operating region of an engine. In many researches, It is generally known that it is profitable in fuel- consumption to operate engine in OOL(Optimal Operating Line). We established the mathematical model of a parallel hybrid electric vehicle, which is linear time-invariant. To operate an engine in OOL, we applied RHC(Receding Horizon Control) to the driving control of a parallel hybrid electric vehicle. And it is known that the RHC has advantages such as good tracking performance under state and control constraints. This RHC is obtained by using linear matrix inequality (LMI) optimization. In this paper, there are three main topics. First, without state and control constraints, the optimal tracking of OOL was simulated. Second, with state and control constraints by engine and motor performances, the optimal tracking of OOL was simulated. In the last, we studied on the optimal gear ratio. That is to say, we combined the RHC and the iterative simulation to extract the optimal gear ratio. In this simulation, the vehicle is commanded to track the reference vehicle trajectory and the engine is operated in the optimal operating region which is made by the state constraints.

기호설명

RHC: Receding Horizon Control

OOL: Optimal Operating Line

1. 서론

고연비/저공해를 목적으로 하는 하이브리드 차량의 주행제어를 위한 연구로는, 간략화 된 수학적모델을 세운 뒤, 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control)와 Pontryagin's Minimum Principle 을 적용하거나[2], 엔진과 모터의 실험자료를 바탕으로 주행제어 알고리즘을 작성하는 연구[3]가 있다. 또한 최근에 와서는 퍼지나 신경회로망을 적용하기도 한다[4-5].

본 논문에서는 병렬형 하이브리드 차량의 주행

제어에 동적 구간 제어(RHC)를 적용하고자 한다. 이를 위해, 시스템을 선형 시불변(Linear Time-invariant)시스템으로 가정하고, 시스템의 운동방정식, 구속조건식, 엔진과 모터의 동특성과 관련된 수학적 모델을 이용하였다. 연구 내용으로는, 첫째, 제어변수와 상태변수에 제한 조건이 없는 경우, 엔진의 최적 작동선으로 알려져 있는 OOL 을 추종하는 문제를 다루었다(Unconstrained Optimal Tracking Problem). 둘째, 엔진과 모터 성능에 의한 제한 조건이 있는 경우, OOL 을 추종하는 문제에 RHC 를 적용하였다(Constrained Optimal Tracking Problem). 셋째, 위에서 적용한 RHC 에 반복적 (Iterative)인 시뮬레이션 기법을 추가하여 최적 기어를 구하는 연구를 수행하였다.

2. 시스템

본 본문에서 다루고자 하는 병렬형 하이브리드 자동차의 개략도와 구조도는 Fig. 1 과 Fig. 2 와 같다. 38kw 급의 가솔린 엔진과 30kw 급의 AC

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 고려대학교 전기공학부

*** 서울산업대학교 기계설계학과

**** 서울대학교 기계항공공학부

Induction 모터의 동력이, 1.5의 연결기어비(RCG)를 통해 합쳐진 후, 자동변속기(AT)나 자동화변속기(AMT) 또는 무단변속기(CVT)와 같은 동력 전달장치를 통해 차량축에 연결된다.

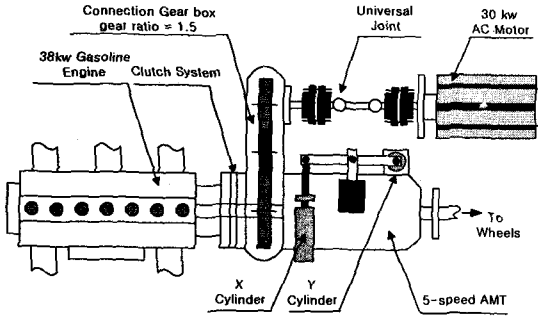


Fig. 1 Configuration of a Parallel Hybrid Electric Vehicle

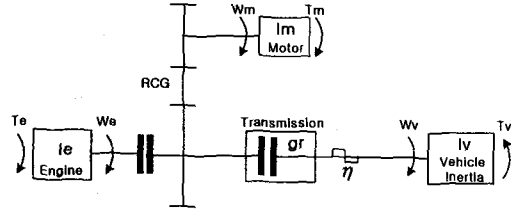


Fig. 2 Schematic Diagram of a Parallel Hybrid Electric Vehicle

이 시스템과 관련된 수학적 모델링은 다음과 같다.

$$[Ie + RCG^2 \cdot Im + \frac{Iv}{(gr \cdot \eta)^2}] \cdot \dot{We} = Te + RCG \cdot Tm - \frac{Tv}{gr \cdot \eta}$$

$$Wm = RCG \cdot We, \quad Wv = \frac{We}{gr \cdot \eta} \quad (1)$$

$$\dot{Te} = \frac{Te_{set} - Te}{\tau_e} \quad (2)$$

$$\dot{Tm} = \frac{Tm_{set} - Tm}{\tau_m} \quad (3)$$

(1)식은 시스템의 운동방정식 및 구속조건식을 나타내며, (2), (3)식은 각각 엔진과 모터의 동특성을 나타내는 식이다. 제어변수로는 엔진토크의 명령치(Te_{set}), 모터토크의 명령치(Tm_{set}), 기어비(gr)가 될 수 있으나, 기어비를 추가할 경우 시스템이 비선형 가변시스템이 되므로 시스템의 간략화를 위해 Table 1에 나와있는 것처럼 상수로 가정하였다(기어비에 대한 연구는 5장에서 상술). 제어변수와 상태변수(Te :엔진토크[Nm], Tm :모터토크[Nm], We :엔진속도[rad/s])는 식 (4), (5)와 같으며, 이산화된 시스템의 상태방정식과 출력은 식 (6), (7)과 같으며, 제어가능(Controllable), 관측가능(Observable)하다.

$$u = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Te_{set} \\ Tm_{set} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$x = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Te \\ Tm \\ We \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$x(i+1) = A_d x(i) + B_d u(i) \quad (6)$$

$$y(i) = x(i) \quad (7)$$

$$A_d = \begin{Bmatrix} 1 - \Delta t / \tau_e & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \Delta t / \tau_m & 0 \\ \Delta t / I & \Delta t \cdot RCG / I & 1 - \Delta t \cdot c / (I \cdot (gr \cdot \eta)^2) \end{Bmatrix}$$

$$B_d = \begin{Bmatrix} \Delta t / \tau_e & 0 \\ 0 & \Delta t / \tau_m \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$$

$I = Ie + RCG^2 \cdot Im + \frac{Iv}{(gr \cdot \eta)^2}$	입력축에 대한 차량의 등가강성
$Im = 0.02 [kgm^2]$	모터관성
$Ie = 0.1 [kgm^2]$	엔진관성
$Iv = 100.2 [kgm^2]$	차량관성
$c = 15.228 [Nm/(rad/s)]$	주행부하와 관련된 비례상수
$gr = 4.0$	기어비
$RCG = 1.5$	연결기어비
$\eta = 2.837$	최종감속비

Table 1 System Data

3. 제한조건이 없는 경우 OOL의 추종

하이브리드 차량의 고연비를 실현하기 위한 많은 연구에서, 엔진을 연료소비를 최소화하는 작동점에서 운행하는 것이 유리하다고 알려져 있다[4]. Fig. 3은 엔진의 연료소비율(Brake Specific Fuel Consumption [g/kwh])을 나타내는 맵으로서, 동일한 파워를 내고 있을 때, 가장 적은 연료소비를 나타내는 점이 최적 작동점이 되며, 이 점들을 연결한 선이 OOL이다. 본 장에서는 제한조건이 없는 경우, 엔진의 작동점이 OOL을 추종하도록 제어하는 연구를 수행하였다. 이를 위해, 성능지수식 (8), (9), (10)과 같이 정하였다[1].

$$J(x(t), t) = J_1(x(t), t) + J_2(x(t), t) \quad (8)$$

$$J_1(x(t), t) = \sum_{i=0}^{N-1} \left((x(t+i|t) - x_r(t+i|t))^T Q (x(t+i|t) - x_r(t+i|t)) + u^T(t+i|t) R u(t+i|t) \right) \quad (9)$$

$$J_2(x(t+N|t), t) = (x(t+N|t) - x_r(t+N|t))^T Q_f (x(t+N|t) - x_r(t+N|t)) \quad (10)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 20.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

즉, 0 부터 $N-1$ Horizon 에 걸쳐 상태변수 추종에러와 제어량과 관련된 식 (9)와 final Horizon N 에서의 상태변수 추종에러와 관련된 식 (10)의 합을 최소로 하는 제어를 구하게 된다. $x_r(t+i|t)$ 와 $x_r(t+N|t)$ 에는 Tracking 하게 되는 OOL 이, 해당 Horizon 에 맞도록 정의되어 있다. 또한 Q_f 는 LMI Optimization 을 통하여 성능지수의 안정성을 보장하는 값으로 결정하여 사용된다.

상태변수와 제어변수의 가중치 행렬 Q 와 R 은 식 (11)과 같이 결정하였다. 즉 제어량보다는 추종 성능에 가중치를 더 주기 위해, 상대적으로 Q 의 값을 크게 설정하였으며, Q 의 20.0 은 엔진토크의 가중치를 크게 설정함을 의미하며, 0.001 은 모터토크의 가중치를 작게 설정함을 의미한다.

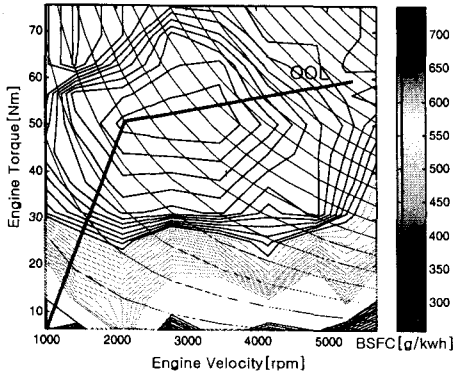
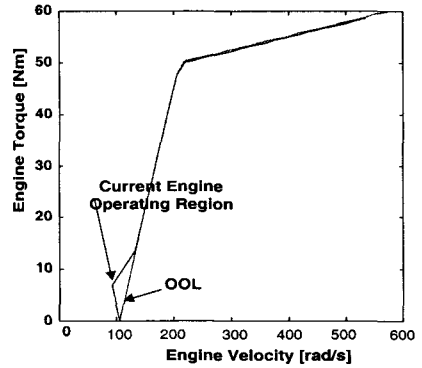


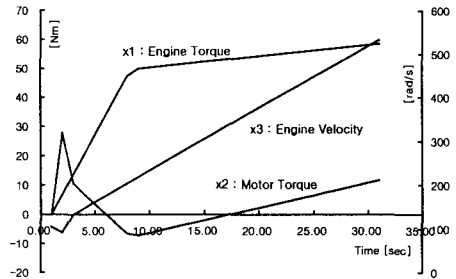
Fig. 3 OOL of 38kw Gasoline Engine

시뮬레이션 결과는 Fig. 4 와 같다. Fig. 4 (a)에서 보는 바와 같이 초기의 과도상태를 제외하고, 엔진의 작동선이 OOL 을 정확하게 추종함을 확인 할 수 있다.

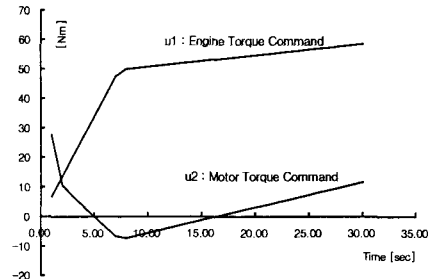
Fig. 4 (b)의 상태변수 궤적을 살펴보면, 차량의 초기 출발 시에는 주행부하로 인해서 많은 토크가 요구되어 지지만, 엔진은 OOL 을 추종해야 하므로 엔진토크로는 주행부하를 감당하지 못하게 된다. 따라서, 약 7 초까지 모터가 토크를 더하게 된다. 7 초 이후부터는 OOL 을 추종하는 엔진토크가 주행부하보다 크므로 토크의 여분이 생기게 되며, 이 남은 동력은 배터리를 충전하는 데 사용된다. 즉 7 초부터 17.5 초까지는 모터토크가 음수가 된다. 17.5 초부터는 다시 주행부하를 감당하기 위해 모터가 토크를 더해주게 된다.



(a) Engine Operating Region



(b) State Trajectory



(c) Control History

Fig. 4 Results of Unconstrained Optimal Tracking

4. 제한조건이 있는 경우 OOL 의 추종

엔진과 모터의 성능에 따른 제한조건이 추가된 상태에서 엔진의 OOL 을 추종하는 연구를 수행하였다.

상태변수와 제어변수의 제한조건은 식 (12), (13)과 같다[1].

$$Te_{\min} \leq x_1 \leq Te_{\max}, \quad Tm_{\min} \leq x_2 \leq Tm_{\max}$$

$$We_{\min} \leq x_3 \leq We_{\max} \quad (12)$$

$$Te_{\min} \leq u_1 \leq Te_{\max}, Tm_{\min} \leq u_2 \leq Tm_{\max} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & (Te_{\min} = 0.0[Nm], Te_{\max} = 70.0[Nm], \\ & We_{\min} = 62.8[rad/s], We_{\max} = 576.0[rad/s], \\ & Tm_{\min} = -30.0[Nm], Tm_{\max} = 30.0[Nm], \\ & c = 30.456[Nm/(rad/s)]) \end{aligned}$$

제약조건이 있는 경우, LMI Optimization 을 적용하기 위한 SDP(Semi-Definite Prgramming)형태는 식 (14)~(21)과 같다[1]. 즉, 식(15)~(21)를 만족시키면서, (14)식의 성능지수($\gamma_1 + \gamma_2$)를 최소화 하는 제어와, RHC 를 적용할 때, 이 성능지수를 안정화 시키는 Terminal Matrix Q_f 를 구하게 된다.

(15), (16)식은 각각 $0 \sim N-1$, N Horizon 에서의 성능지수를 나타내는 식이며, (17)는 성능지수를 안정화 시키는 Q_f 의 조건을 나타낸다. (18), (19)식은 각각 제어변수와 상태변수의 제한조건을 나타내는 식으로서, $0 \sim N-1$ Horizon 에 대해 벡터 형식으로 표현된다. (20), (21)식은 $i \geq N$ 인 경우, 주어진 제한조건을 만족시키고, 시스템을 안정화 시키며, 상태 궤적을 region ϵ_{Q_f} 에 머물게 하는 조건을 나타낸다.

$$\text{Minimize } \gamma_1 + \gamma_2 \quad (14)$$

$$\Lambda = \{\gamma_1, \gamma_2, X, Y, Z, V, U\}, Y = HX, X = \gamma_2 Q_f^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 - V^T U(t) - V_0 & (W^{1/2} U(t))^T \\ W^{1/2} U(t) & I \end{bmatrix} \geq 0 \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & (A^N x(t) + \bar{B} U(t))^T \\ A^N x(t) + \bar{B} U(t) & X \end{bmatrix} \geq 0 \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} X & (AX + BY)^T & (Q^{1/2} X)^T & (R^{1/2} Y)^T \\ AX + BY & X & 0 & 0 \\ Q^{1/2} X & 0 & \gamma_2 I & 0 \\ R^{1/2} Y & 0 & 0 & \gamma_2 I \end{bmatrix} \geq 0 \quad (17)$$

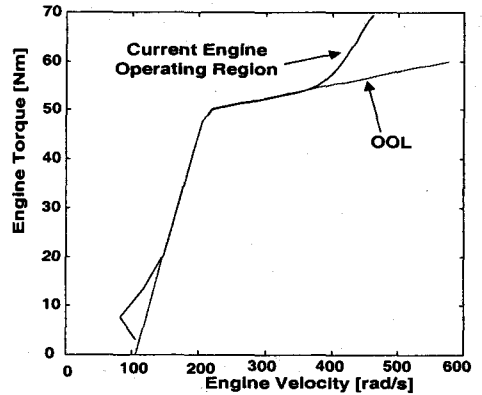
$$\begin{aligned} \hat{u}_{\min} \leq U(t) \leq \hat{u}_{\max}, \quad \hat{u}_{\min} &= [Te_{\min}, Tm_{\min}, \dots]^T, \\ \hat{u}_{\max} &= [Te_{\max}, Tm_{\max}, \dots]^T \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \hat{g}_{\min} \leq \hat{G}U(t) + \hat{g}_0 \leq \hat{g}_{\max}, \\ \hat{g}_{\min} &= [Te_{\min}, Tm_{\min}, We_{\min}, \dots]^T, \\ \hat{g}_{\max} &= [Te_{\max}, Tm_{\max}, We_{\max}, \dots]^T \end{aligned} \quad (19)$$

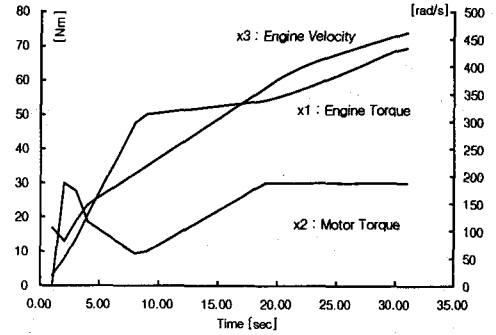
$$\begin{bmatrix} Z & Y \\ Y^T & X \end{bmatrix} \geq 0, Z \leq \begin{bmatrix} (Te_{\max})^2 & 0 \\ 0 & (Tm_{\max})^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$GXG^T \leq V, V \leq \begin{bmatrix} (Te_{\max})^2 & 0 & 0 \\ 0 & (Tm_{\max})^2 & 0 \\ 0 & 0 & (We_{\max})^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

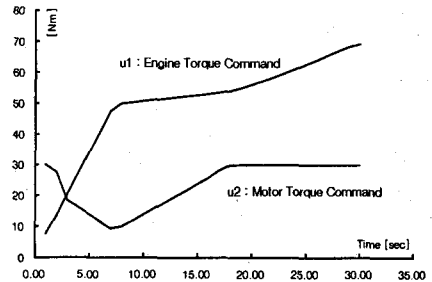
시뮬레이션 결과는 Fig. 5 와 같다. 0 ~ 19 초까지의 상태변수 궤적과 OOL 추종성능은 3 장의 제한조건이 없는 상태와 비슷하지만(이 장에서는 주행부하를 두 배로 증가 시켜, 모터토크가 음수가 되는 경우는 발생하지 않았다), 19 초 이후부터는 모터토크가 상한선에 걸리므로 ($Tm_{\max} = 30.0$), 차량이 주행부하를 감당하며 운행하기 위해서 엔진토크가 OOL 을 벗어나 증가되는 양상을 나타내고 있다.



(a) Engine Operating Region



(b) State Trajectory



(c) Control History

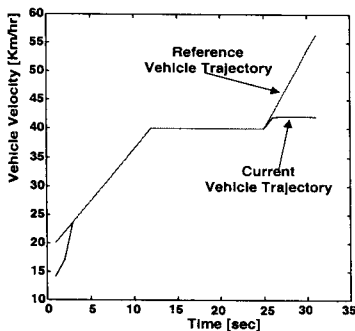
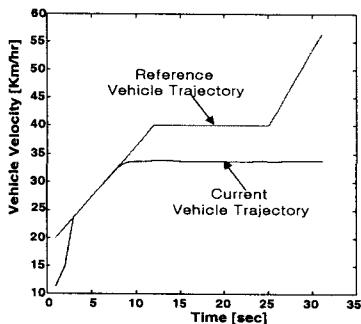
Fig. 5 Results of Constrained Optimal Tracking

5. 최적기어비 도출에 관한 연구

2장에서 언급하였듯이 제어변수에 기어비가 추가 될 경우, 시스템은 비선형 가변시스템이 되므로, 간략화를 위해 상수로 가정하였다. 상수로 가정할 경우, 문제점은 Fig. 6 과 같다. 계단형으로 되어있는 기준 차량궤적(Reference Vehicle Trajectory)를 추종하는 문제에 있어서, 기어비가 5 일 경우(Fig. 6 (a)), 8 초 이후부터는 차량속도에 대응되는 엔진속도가 제한조건에 걸려, 기준 차량궤적을 더 이상 추종하지 못하게 된다. 기어비가 4 일 경우(Fig. 6 (b))는, 기어비가 5 일 경우에 비해 추종성능은 개선되지만, 25 초 이후부터는 마찬가지로 추종성능이 저하되었다.

따라서, 본 장에서는 위 문제점을 해결하기 위해, 선형 불변시스템에 적용 가능한 RHC 에 반복적(Iterative)인 시뮬레이션 방법을 추가하여 최적 기어비를 구하는 연구를 수행하였다. 시뮬레이션을 수행 시 조건은 다음과 같다.

- (1) 차량은 Fig. 6 에서와 같은 기준 차량궤적을 추종한다.
- (2) 동시에 엔진은 최적작동영역(Optimal Operating Region, 앞장에서의 OOL 에서 발전된 개념으로서, 상태변수의 제한조건을 이용해 엔진 가용영역을 사각형 형태로 지정하였다)으로 정의된 영역에서 운행된다.
- (3) 위와 같은 조건에서 시뮬레이션을 통해, 기어비를 변경시키면서, 최적기어비를 추출한다.



(b) Gear Ratio(gr) = 4.0

Fig. 6 Tracking Error of a Parallel Hybrid Electric Vehicle as to Gear Ratio(gr)

시뮬레이션을 위한 흐름도는 Fig. 7 과 같다. 사용할 수 있는 기어비의 최대치(Gear_max)와 최소치(Gear_min)를 설정한 다음, 시뮬레이션을 시작한다. 현재의 기어비를 Gear_max 로 설정하여 RHC 를 적용한 후, 기준 차량궤적에 대한 추종에러가 0.5km/hr 내에 들어온다면, 성능지수(Cost)를 계산하게 되는데, 이 때의 성능지수는 RHC 의 성능지수가 아니라, 엔진의 연료소비율과 배터리 잔존용량과 관련된, 엔진파워와 모터파워에 가중치를 더하여 정의하였다. 이 과정을 기어비의 최소치까지 반복하여, 성능지수를 최소로 하는 기어비를 현재 시점의 최적기어비로 결정하며, 결정된 최적기어비를 이용해 다시 한번 최종적으로 RHC 를 적용한다. 위 과정을 시뮬레이션 시간이 종료될 때까지 반복해서, 시간에 따른 최적 기어비를 산출해 저장한다.

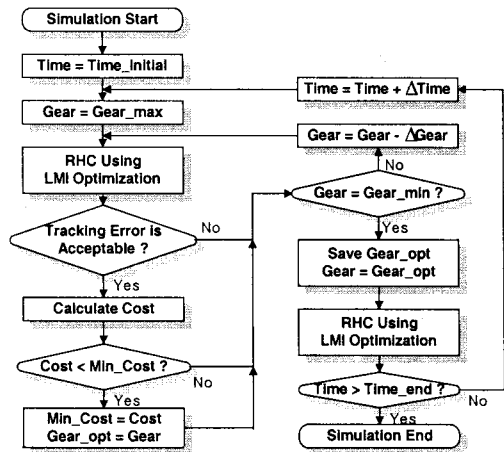


Fig. 7 Flowchart of the Simulation Extracting Optimal Gear Ratio

위 시뮬레이션을 통해 얻은 최적기어비는 Fig. 8 과 같으며, 2.70 에서부터 7 초가 될 때까지 감소하다가 그 이후부터는 2.50 로 고정됨을 알 수 있다. Fig. 9 는 추출된 최적기어비를 이용해 시뮬레이션 한 결과이며, 기준 차량궤적을 0.5km/hr 의 에러 내에서 정확하게 추종하고 있고, 동시에 엔진의 작동점은 최적작동영역 내에 위치함을 알 수 있다. 이 때의 상태변수 궤적은 Fig. 9 (c)와 같다.

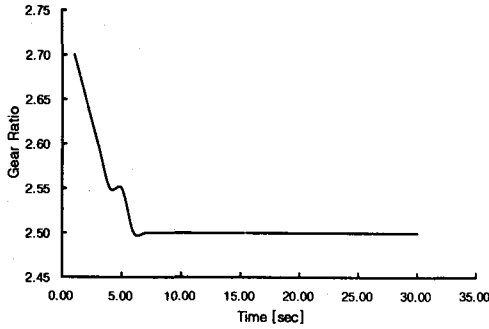
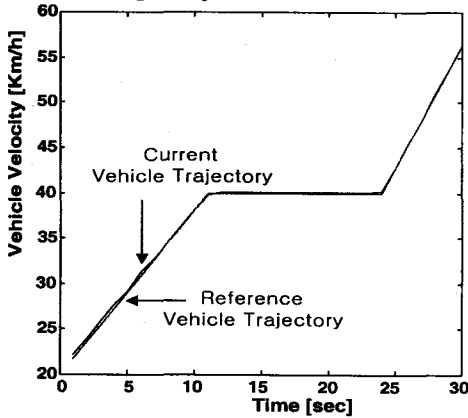
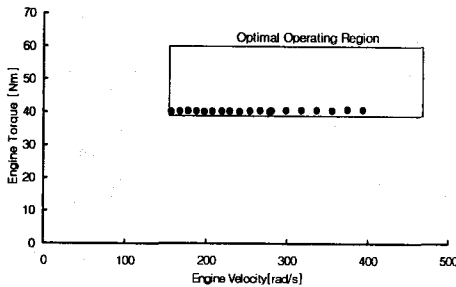


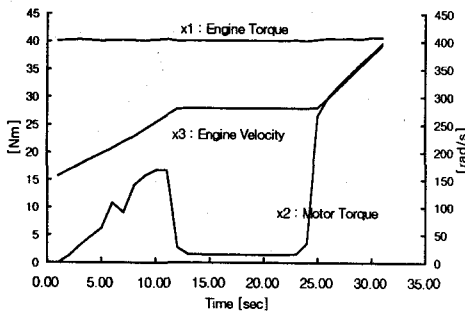
Fig. 8 Optimal Gear Ratio



(a) Vehicle Trajectory



(b) Engine Operating Region



(c) State Trajectory

Fig. 9 Results of Simulations using Optimal Gear Ratio

6. 결론

본 연구에서는 RHC 를 병렬형 하이브리드 차량의 주행제어에 적용하였으며, 세부 연구 내용은 다음과 같다.

1. 제한조건에 없는 상태에서, 엔진의 연료소비를 최소화하는 작동영역으로 알려져 있는 OOL 를 추종하는 문제를 다루었으며, 추종성능을 확인하였다.
2. 엔진과 모터의 성능에 의한 상태변수와 제어변수에 제한조건이 추가된 상태에서 엔진의 OOL 를 추종하는 연구를 수행하였으며, 시스템의 성능에 따라 OOL 추종 에러가 커질 수 있음을 보였다.
3. 선형 불변 시스템의 RHC 과 반복적인 시뮬레이션을 조합하여, 최적기어비를 산출하는 연구를 수행하였다. 산출된 최적기어비를 이용해, 임의로 설정된 계단형의 기준 차량궤적에 대한 추종성능의 개선 및, 동시에 엔진이, 상태변수의 제한조건으로 구현된 최적작동영역 내에서 작동함을 확인하였다.

후기

본 연구는 기계분야 BK-21 사업의 지원하에 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Wook Hyun Kwon, Ki Back Kim, (will be published in 2000), *Receding Horizon Predictive Control*.
- (2) Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. h.c. D.Shroder, 2000, "The Autark Hybrid Vehicle Optimization and Controller Design," Technical Report, Seoul National University.
- (3) 조성태, 전순일, 이장무, 박영일, 조한상, 2000, "병렬형 하이브리드 동력전달계의 성능 민감도 해석," 한국자동차공학회논문집 제 8 권 제 1 호, pp. 72~84.
- (4) 김달철, 전재원, 김현수, 1999, "퍼지로직에 의한 엔진-CVT 통합제어 성능고찰," 한국자동차공학회논문집 제 7 권 제 4 호, pp.125~134.
- (5) Bernd Baumann, Giorgio Rizzoni and Gregory Washington, 1998, "Intelligent Control of Hybrid Vehicles Using Neural Networks and Fuzzy Logic," *SAE Paper*, 981061.