

4WD HEV의 회생제동 제어로직 개발

여 훈¹⁾ · 김 동 현¹⁾ · 김 달 철²⁾ · 김 철 수²⁾ · 황 성 호³⁾ · 김 현 수^{*3)}

성균관대학교 기계공학부¹⁾ · 현대자동차²⁾ · 성균관대학교 기계공학부³⁾

Development of Regenerative Braking Control Algorithm for a 4WD Hybrid Electric Vehicle

Hoon Yeo¹⁾ · Donghyun Kim¹⁾ · Talchol Kim²⁾ · Chulsoo Kim²⁾ · Sungho Hwang³⁾ · Hyunsoo Kim^{*3)}

¹⁾School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-746, Korea

²⁾Hyundai Motor Company, 772-1 Jangduck-dong, Whasung-si, Gyeonggi 445-706, Korea

³⁾School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-746, Korea

(Received 31 January 2005 / Accepted 16 August 2005)

Abstract : In this paper, a regenerative braking algorithm is proposed to make the maximum use of the regenerative braking energy for an independent front and rear motor drive parallel HEV. In the regenerative braking algorithm, the regenerative torque is determined by considering the motor capacity, motor efficiency, battery SOC, gear ratio, clutch state, engine speed and vehicle velocity. To implement the regenerative braking algorithm, HEV powertrain models including the internal combustion engine, electric motor, battery, manual transmission and the regenerative braking system are developed using MATLAB, and the regenerative braking performance is investigated by the simulator. Simulation results show that the proposed regenerative braking algorithm contributes to increasing the battery SOC, which recuperates 60 percent of the total braking energy while satisfying the design specification of the control logic. In addition, a control algorithm which limits the regenerative braking is suggested by considering the battery power capacity and dynamic response characteristics of the hydraulic control module.

Key words : Regenerative braking(회생제동), HEV(하이브리드 전기자동차)

1. 서론

회생제동(regenerative braking)은 제동시 마찰로 소모되는 운동에너지를 배터리, 울트라 캐패시터와 같은 에너지 저장장치에 저장하여 이를 구동시에 다시 이용할 수 있도록 하는 기술이다. 배터리를 에너지 저장장치로 사용하는 하이브리드 전기자동차(hybrid electric vehicle : HEV)에서 회생제동 기술은 연비개선의 핵심적인 기술로서 Toyota의 HEV

'New Prius'에서는 회생제동에 의한 에너지 향상 효과가 전체 에너지 향상 100%의 36%를 차지하고 있다.¹⁾

최근 자동차 판매 상황을 살펴보면 RV (recreation vehicle) 및 SUV(sports utility vehicle) 차량의 수요가 폭발적으로 증가하고 있다. 미국 자동차 시장의 경우 SUV, 픽업트럭, 미니밴을 포함한 경트럭의 판매량이 증가하여 승용차와 경트럭의 판매 비중이 거의 같은 비율에 달하고 있다. 이에 따라 전세계 선진 자동차 회사들은 차량성능과 경제성이 뛰어난 RV/SUV 차량의 개발에 박차를 가하고 있다.

*To whom correspondence should be addressed.

hskim@me.skku.ac.kr

이점에 주목한 Toyota는 THS(toyota hybrid system) 프로젝트에 의해 개발된 “Prius”에서의 HEV 기술을 4WD(4 wheel drive) 차량에 적용시켜 2001년 4WD HEV인 “Estima”를 개발하여 시판하였다.^{2,3)} “Estima”는 고효율 엔진, 전·후륜 모터, CVT 등을 이용하여 기존 4WD 차량 대비 2배의 높은 연비를 개선했다.

우리나라는 2004년 10kW급 모터를 장착한 소형 병렬형 HEV인 ‘Click’ 50대를 환경부에 납품하여 HEV 시대를 열었으나 이는 순수한 전기구동이 불가능한 소프트타입 HEV로서 향후 세계시장에서의 경쟁력 강화를 위하여는 모터의 용량이 증가된 하드타입 중형 HEV의 개발이 필수적이다. 4WD HEV는 RV/SUV에 대한 소비자의 요구와 중형 하드타입 HEV 개발의 필요성이 접목되는 분야로서 이의 국내개발은 반드시 요구되며 회생제동 시스템은 4WD HEV의 연비 개선을 위하여 반드시 요구되는 기술이다.

회생 제동에 관한 연구는 초기 전기자동차(electric vehicle : EV)에 적용을 위하여 시작 되었으며 주로 회생제동 제어 알고리즘에 대하여 수행되었다. Wyczalek 등은 EV 차량의 회생제동에 의하여 충전되는 에너지효율을 고려하여 회생 제동 시스템의 수학적 모델을 제시하였다.⁴⁾ Gao 등은 회생제동 에너지를 정량적으로 분석하고 모터 특성에 따라 제동력을 분배하는 로직을 제시한 바 있으며⁵⁾ 이밖에 동력분기형 2축 HEV에 대하여 브레이크 페달이 작용할 때 트랙션 모터의 회생제동토크를 브레이크 페달과 차량속도의 크기에 따라 결정하는 회생제동 알고리즘이 연구되었다.⁶⁾

회생제동 제어로직은 하이브리드 차량의 구조와 변속기, 모터, 배터리 등 파워트레인 각 요소들의 구조와 특성에 따라 적절한 제어 알고리즘이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 수동변속기(MT)를 장착한 전·후륜 독립모터방식 4WD HEV 차량에 대하여 운전자 제동 의지와 차량의 주행 상태에 따른 최대의 회생제동 에너지를 회수할 수 있는 전·후륜의 회생제동 제어로직을 제안하였다.

2. 4WD HEV의 회생제동 제어로직

Fig. 1은 연구대상 차량의 구조도이다. 연구대상 4WD HEV의 전륜 동력원으로는 1.4L급 엔진과 12kW급 모터가 1축으로 연결되어 있고 변속기로는 수동변속기를 사용하였다. 후륜에는 20kW급 모터가 감속기와 함께 장착되어 기존의 트랜스퍼 케이스와 같은 동력전달장치 없이 단독으로 후륜을 구동하여 4WD HEV를 구현하게 된다.

회생제동 시스템은 4개의 휠에 유압을 공급하기 위한 EHB(electro hydraulic brake), 운전자의 페달감을 모사하기 위한 페달 시뮬레이터와 브레이크 시스템으로 구성된다. 운전자가 브레이크 페달을 밟으면 마스터실린더의 압력과 페달 스트로크로 운전자의 요구제동량을 계산하고 회생제동에 따른 유압제동을 EHB로 구현하게 된다.

Fig. 1과 같은 4WD HEV의 회생제동을 위하여는 운전자의 제동의지, 즉 제동페달량과 차량의 주행 상태에 대하여 회생제동을 수행할지, 유압제동을 수행할지 또는 회생제동과 유압제동을 동시에 수행할지의 여부를 먼저 결정해야 한다. 또한 결정된 회생제동모드에 대하여 전륜과 후륜 모터의 회생제동토크의 크기를 결정하여 한다.

이 연구에서는 Fig. 1의 전·후륜 독립모터 방식 4WD HEV에 대하여 회생제동시 운전자의 제동의지와 차량주행상태에 대하여 전·후륜의 회생제동토크의 크기를 결정하는 회생제동 제어 알고리즘을 제시하고자 한다.

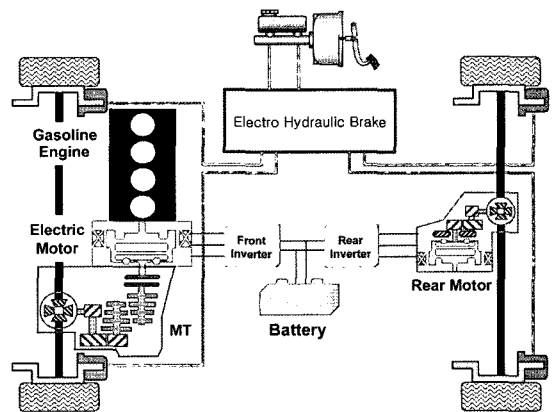


Fig. 1 Structure of 4WD HEV

2.1 회생제동토크 결정 로직

전·후륜모터의 회생제동 토크를 결정하기 위하여는 먼저 전·후륜 바퀴의 제동력 분배가 결정되어야 한다. Fig. 2에 연구대상 차량의 요구 감가속도에 대한 제동력 분배선도를 도시하였다. 전륜과 후륜의 제동력은 운전자의 요구 감가속도가 결정되면 이상제동력 분배곡선으로 결정된다. 연구에 사용된 실제 제동력 분배선도는 후륜에 먼저 록이 일어나는 것을 방지하기 위하여 이상제동력 선도보다 후륜제동력이 작게 설정하였다.

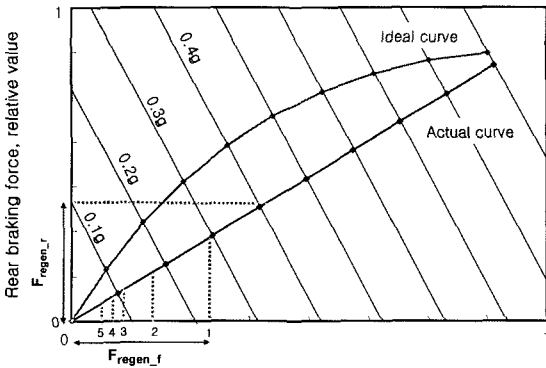


Fig. 2 Brake torque distribution curve

전·후륜 모터의 회생제동 토크는 요구제동력과 현재 기어비로 계산되며, 모터속도와 효율을 고려하여 각각 다음과 같이 구해진다.

$$T_{mf} = \frac{F_{fb} \times R_t}{N_{df} \times gear_ratio} \quad (1)$$

$$T_{mr} = \frac{F_{rb} \times R_t}{N_{dr}} \quad (2)$$

여기서 F_{fb} 는 전륜의 요구제동력, F_{rb} 는 후륜의 요구제동력, N_{df} 는 전륜의 종감속기어비, N_{dr} 은 후륜의 종감속기어비, $gear_ratio$ 는 수동변속기의 기어비, R_t 는 타이어 반경이다.

본 연구에서는 회생제동력(토크)을 최대화하는 것을 목표로 하였다. 발전기(모터)의 회생제동 토크는 다음 식으로 표시된다.

$$T_{REGEN} = T_0 \eta \quad (3)$$

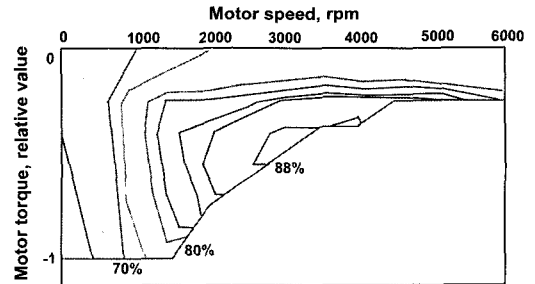
여기서 T_0 는 공칭토크이며 η 는 발전기의 효율이

다. 회생제동토크 T_{REGEN} 을 최대화 하기 위하여는 주어진 모터속도에서 발전기 효율 η 가 최대인 영역에서 회생제동이 이루어져야 한다.

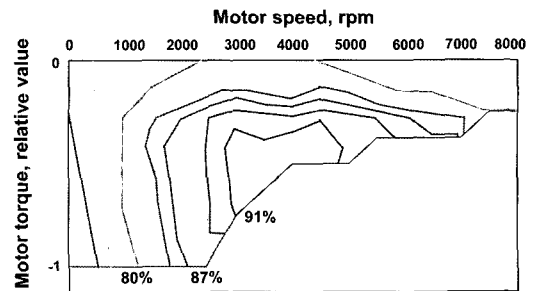
연구대상 전·후륜 독립모터방식 4WD HEV 차량의 전·후륜 모터의 발전기 효율 특성을 Fig. 3에 각각 도시하였다.

전륜과 후륜 모터의 발전기 효율 특성은 3000~4000rpm 사이의 고토크 영역에서 가장 효율이 높은 특성을 가지고 있다. 또한 일정속도에 대한 효율은 고토크 영역으로 갈수록 더 높은 특성을 보이고 있다.

연구대상 4WD HEV의 전·후륜 모터의 효율은 일정 회전수에서 토크가 증가할수록 높은 효율 특성을 보이기 때문에 최대 회생제동 토크는 다음과 같이 결정된다. 예를 들어 전륜의 경우 운전자의 요구 감속도에 따른 전륜의 제동토크가 A라면(Fig. 4) 현재 주어진 모터속도 ω_A 에서 요구된 회생제동토크와 교차하는 지점 B에서 회생제동토크가 결정된다. 만약 요구된 회생제동 토크가 C라면 C는 모터의 최대 회생제동토크 D보다 크기 때문에 회생제동으로만 제동을 할 수 없다. 따라서 회생제동 토크는 D로 결정되며 C와 D의 차이에 해당하는 제동토크를 유압



(a) Front



(b) Rear

Fig. 3 Efficiency map of the motor

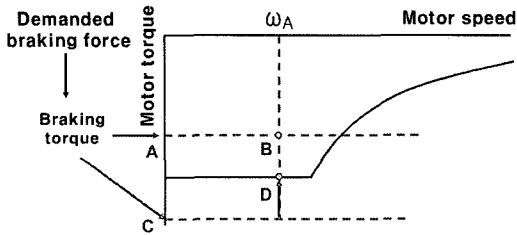


Fig. 4 Regenerative torque

제동에 의하여 보상한다.

모터의 회생제동토크의 크기는 주어진 차량상태에 대하여 MT의 기어비, 배터리 충전량, 엔진속도, 클러치상태, 유압모듈의 특성을 고려하여 제어되어야 한다. 먼저 회생제동시 배터리의 SOC, 클러치 상태, 엔진속도 및 차량속도를 고려한 가중합수 (weight factor)를 적용하여 다음과 같이 회생제동토크를 구하였다.

$$T_{REGEN} = T_0 \eta W_1 W_2 W_3 W_4 \quad (4)$$

여기서 W_1 은 배터리 SOC에 대한 가중치 함수, W_2 는 클러치 작동상태에 따른 가중치 함수, W_3 는 엔진속도에 따른 가중치 함수, W_4 는 차속에 대한 가중치 함수이다.⁷⁾

Fig. 5는 클러치 작동상태에 따른 가중치 함수 W_2 를 나타낸 것이다. 여기서 Clutch_disp_a는 클러치 조작 인지 변위, Clutch_disp_b는 클러치 해제 시작 변위이다. 클러치가 완전히 해제되면 전륜의 회생제동이 불가능하므로 클러치가 슬립이 일어나기 전에 회생제동을 선형적으로 0까지 감소시킴으로써 클러치 조작에 따른 동력단절로 인한 토크 변동을 최소화 할 수 있다. 접속 시에는 클러치가 완전히 접

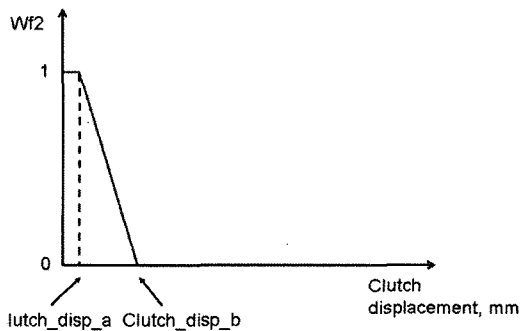


Fig. 5 Weight factor for clutch displacement

속된 후에 회생제동을 실시한다. W_3 은 회생제동 토크로 인하여 엔진속도가 아이들 속도 이하로 떨어져 엔진이 정지하는 상황을 방지하기 위하여 아이들 속도가 되기 전에 엔진속도에 따라 가중치가 선형적으로 감소되도록 설계하였다.

2.2 회생제동 제한 로직

연구대상 4WD HEV의 모터용량은 각각 12kW(전륜), 20kW(후륜)이다. 그러나 배터리의 충전 용량이 23kW로 제한되어 있기 때문에 전륜과 후륜의 회생제동 파워의 합이 23kW 이하로 제한되어야 한다. 먼저 전·후륜의 회생제동 파워가 23kW를 넘는 영역을 찾기 위하여 각 기어단별 차속과 감가속도에 대한 전·후륜의 회생제동 파워를 계산하였다.

Fig. 6은 기어 1단에서 감가속도 0.41g일때 차속에 따른 전륜과 후륜의 회생제동 파워의 계산 예를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 차속이 47km/h 이상인 구간에서 전륜과 후륜의 회생제동 파워의 합이 23kW를 초과하게 된다. 이와같은 방법으로 각각의 감가속도별로 차속에 대하여 전·후륜의 회생제동 파워가 배터리 충전한계를 넘는 경우를 대한 맵을 기어단수별로 도출할 수 있다.

전·후륜의 회생제동 파워합이 배터리 충전한계를 넘는 경우 전륜 또는 후륜의 회생제동량을 제한하는 것이 요구된다. 이 경우 전·후륜 어느쪽을 제한하여도 재생되는 에너지는 23kW로 동일하다. 그러나 회생제동토크에 의해 발생하는 제동력은 전륜 또는 후륜의 제한여부에 따라 달라지게 된다. 연구대상 HEV는 수동변속기 차량으로 운전자의 클러치 접속 해제에 따라 전륜에 회생제동 토크의 변동이

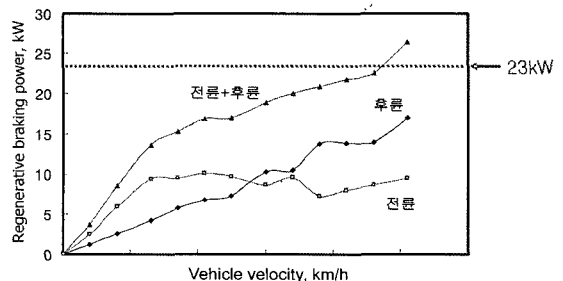


Fig. 6 Regenerative braking power with 1st gear ratio for 0.41g

발생한다. 특히 전륜의 제동력은 상대적으로 후륜에 비해 크기 때문에 전륜을 제한하여 토크변동량을 최소화하기로 한다. 따라서 회생제동 파워합이 23kW를 초과하는 경우 후륜의 회생제동을 우선시하고 전륜의 회생제동을 제한하는 로직을 제안하였다.

전·후륜 모터의 회생제동 파워의 합이 배터리의 회수 가능한 최대 파워보다 클 때에는 후륜의 회생제동 토크는 유지하면서 전·후륜의 회생제동 파워의 합이 배터리 최대 회생제동 파워를 넘지 않도록 전륜의 회생제동 파워를 다음식과 같이 줄여준다.

$$\begin{aligned}
 & \text{if } P_f + P_r \geq \text{Battery_max} \\
 & P_f' = P_f - ((P_f + P_r) - \text{Battery_max}) \quad (5)
 \end{aligned}$$

이때 전륜에서 제한하는 회생제동력은 유압제동에 의하여 보상된다.

2.3 유압모듈 특성을 고려한 회생제동 제어로직

연구대상 HEV에서 클러치가 접속되어 회생제동이 시작되는 경우 유압제동력은 총 요구제동력에 맞추어 감소되어야 한다(Fig. 7). 이때 회생제동력을 급격히 증가시킬 경우, 유압특성에 따른 유압제동력의 응답성능이 늦어져 차량의 총 제동력이 요구제동력보다 커져 이질적인 제동감이 발생할 수 있다. 따라서 모터의 응답성능을 유압모듈의 응답성능과 유사하게 제어하여 제동감 저하를 최소화 하는 것이 필요하다.

Fig. 8에 회생제동 유압모듈의 응답성능을 고려

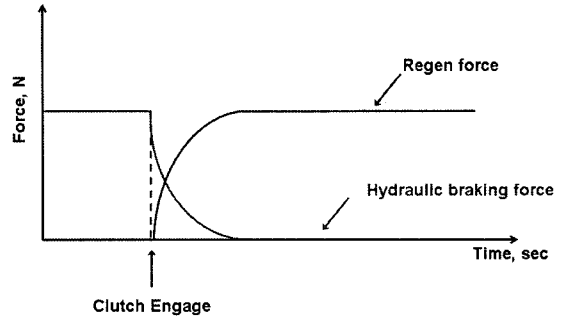


Fig. 7 Response characteristics of regenerative braking and hydraulic braking force

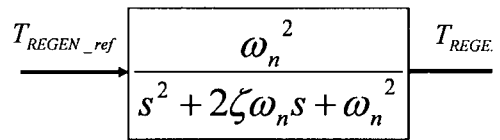


Fig. 8 Block diagram of the response lag compensation

한 회생제동력의 응답지연 보상 알고리즘의 블록선도를 도시하였다. 회생제동토크의 변동량이 크면 모터의 응답성능을 유압모듈의 응답특성과 유사하게 2차 시스템으로 보상하여 제어한다.

Fig. 9는 수동변속기 장착 전·후륜 독립모터방식 4WD HEV의 회생제동 제어로직의 구성도이다. 운전자가 제동페달을 밟으면 이상제동력 선도로부터 전·후륜의 요구제동토크를 먼저 결정하고 운전자의 요구제동토크, 차속, 기어단수에 따라 전·후륜의 회생제동토크를 계산한다. 또한 배터리 SOC, 클러치 상태, 엔진속도, 차량속도에 따른 가중함수를 적용하고 배터리 충전용량을 고려한 회생제동 파워의

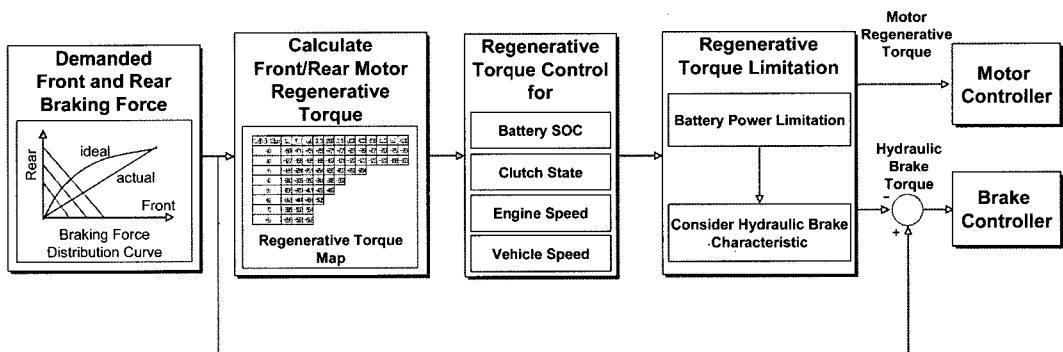


Fig. 9 Block diagram of the regenerative braking algorithm

크기를 제한한다. 총 요구제동량에서 회생제동량을 제외한 나머지는 유압제동에 의하여 보상된다.

3. 4WD HEV 회생제동 성능시뮬레이터

병렬형 전·후륜 독립모터방식 4WD HEV의 회생제동 제어로직을 검증하기 위한 제동성능 해석 시뮬레이터를 개발하였다. 이를 위하여 엔진, 모터, 수동변속기 등을 포함한 4WD HEV 파워트레인의 각 요소와 회생제동 제어로직에 대하여 MATLAB Simulink를 이용한 모듈화 모델링을 수행하였다. Fig. 10은 4WD HEV 성능 시뮬레이터의 Simulink 모델을 도시한 것이다.

Table 1은 시뮬레이션에 사용된 차량, 엔진, 모터, 배터리의 제원을 나타낸 것이다.

Table 1 Vehicle data

| | |
|---------------------------|-------------------------|
| Vehicle mass | 1618 kg |
| Drag coefficient | 0.346 |
| Vehicle frontal area | 1.964 m ² |
| Engine inertia | 0.14 kgm ² |
| Front motor inertia | 0.0413 kgm ² |
| Front motor maximum speed | 6000 rpm |
| Rear motor inertia | 0.0126 kgm ² |
| Rear motor maximum speed | 8000 rpm |
| Battery power | 23kW |

4. 회생제동 성능 시뮬레이션 결과 및 고찰

개발된 성능 시뮬레이터를 이용하여 ECE-15 주행모드에 대한 제동성능 해석을 수행하였다. Fig. 11은 시뮬레이션 결과이다. (a)는 차량 속도를 도시한 것으로 차속은 주행모드를 잘 추종하고 있다. 엔진토크 (b)는 가속시 최고 35Nm의 토크를 나타내며 엔진속도 (c)는 변속이 이루어 질 때마다 감소하는 것을 볼 수 있다. 수동변속기 기어비 (d)는 차속이 증가할수록 고단으로 변속된다. 제동시에는 제동순간의 기어단을 유지하다가 차속 25km/h에서 클러치를 해제하고 기어를 중립으로 놓도록 설정하였다. 제동모드에서는 엔진 스톱을 방지하기 위하여 차속이 25km/h 이하가 되면 전륜의 클러치가 해제되도록 설정하였다.

(e)는 전·후륜의 모터 토크를 도시한 것으로 가속시 모터구동토크는 액셀 페달량에 비례하게 출력된다. 모터를 구동용으로 사용될 때는 액셀 페달량에 따른 가중치 함수를 설정하여 모터를 구동하게 된다. 전·후륜의 모터의 구동시 가중치 함수는 동일하게 설정하였다. 회생제동시 전륜의 모터토크(e)는 클러치 해제로 인하여 후륜보다 먼저 회생제동을 중단하게 된다. 후륜의 회생제동 모터토크는 전륜

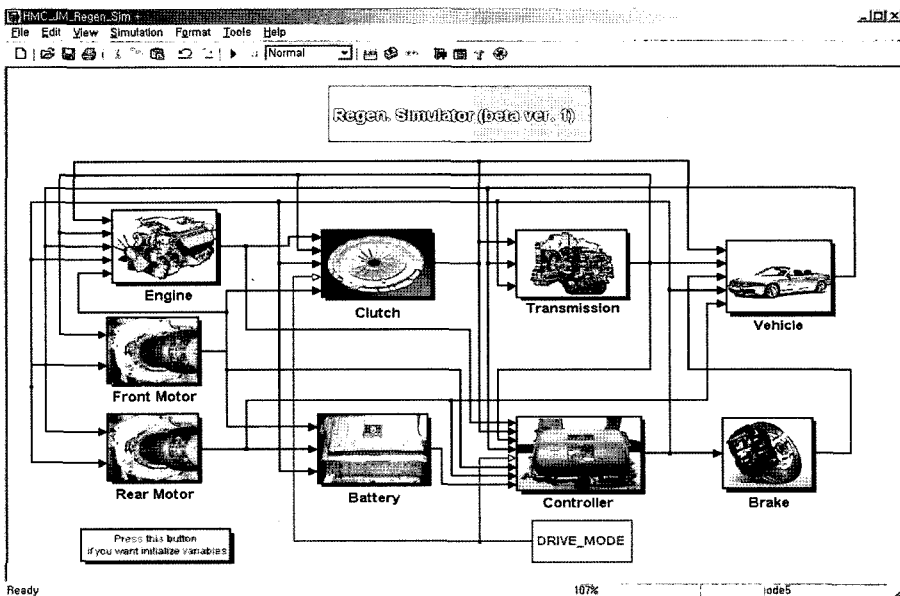


Fig. 10 4WD HEV regenerative braking simulator

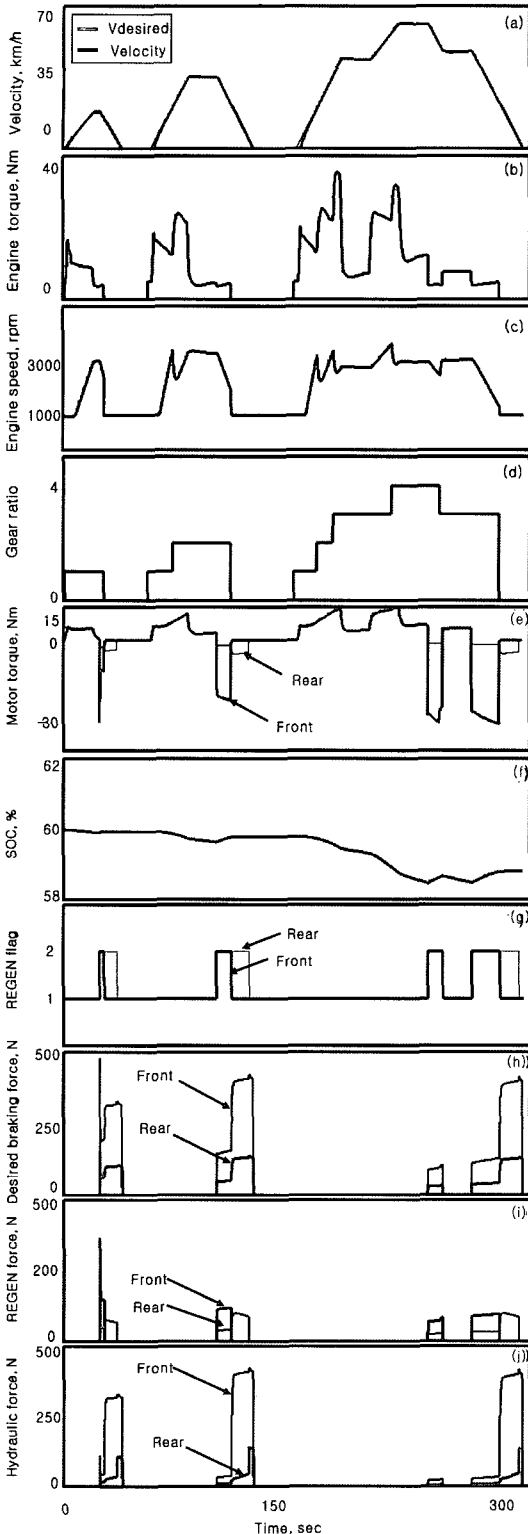


Fig. 11 Simulation results (ECE-15)

보다 약 1/4 이하의 작은 값을 보이는데 이것은 후륜에 먼저 록(lock)이 발생하지 않도록 제동력 분배비를 설정하였기 때문이다. 후륜의 회생제동은 차속 5km/h 이하에서는 수행되지 않는다. 이것은 크리프(creep)주행을 위하여 차속 5km/h 이하에서의 회생제동을 제한하였기 때문이다. 배터리 SOC (f)는 회생제동시 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11(g)는 전·후륜의 회생제동 실시여부를 나타내는 REGEN flag를 도시한 것이다. 전·후륜의 REGEN flag (g)는 회생제동을 수행하지 않을때는 1, 회생제동시는 2로 설정하였다. REGEN flag에서 볼 수 있듯이 클러치 해제로 전륜의 회생제동이 먼저 중단되고 후륜의 회생제동은 저속영역까지 수행되는 것을 볼 수 있다.

(h)는 전·후륜의 요구제동력이다. 요구제동력은 전·후륜 분배비에 따라 후륜보다 전륜의 요구제동력이 더 크게 발생한다. 전·후륜의 요구제동력 중 회생제동력(i)를 제외한 나머지는 유압제동력(j)에 의해 공급되는 것을 볼 수 있다. ECE-15 주행모드에서는 감가속도가 크지 않기 때문에 전·후륜의 회생제동 파워합이 배터리 충전한계(23kW)를 넘는 구간이 발생하지 않는다.

배터리 충전과워 한계를 넘는 경우의 제동성능을 고찰하기 위하여 차속 100km/h에서 10초만에 정지한 경우의 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 12는 배터리 충전과워를 넘는 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다.

Fig. 12의 제동 시뮬레이션에서는 차속 30km/h에서 기어가 중립으로 변속되도록 설정하였다. 따라서 클러치(b)는 차속 30km/h에서 해제가 이루어진다. 운전자의 제동의지가 증가함에 따라 감속시 전륜의 회생제동 모터토크(c)는 최대 -60Nm의 값을 보이며 후륜의 모터토크(d)도 -50Nm의 값을 보인다. 배터리 SOC(e)는 회생제동에 의하여 약 1.8% 증가하는 것을 볼 수 있다.

전륜의 제동력(f)는 클러치가 해제된 이후에는 회생제동이 중단되고 유압제동력으로만 제동을 수행한다. 후륜모터는 독립적으로 장착되어 있기 때문에 후륜 제동력(g)은 클러치가 해제된 이후에도 회생제동력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 전륜의

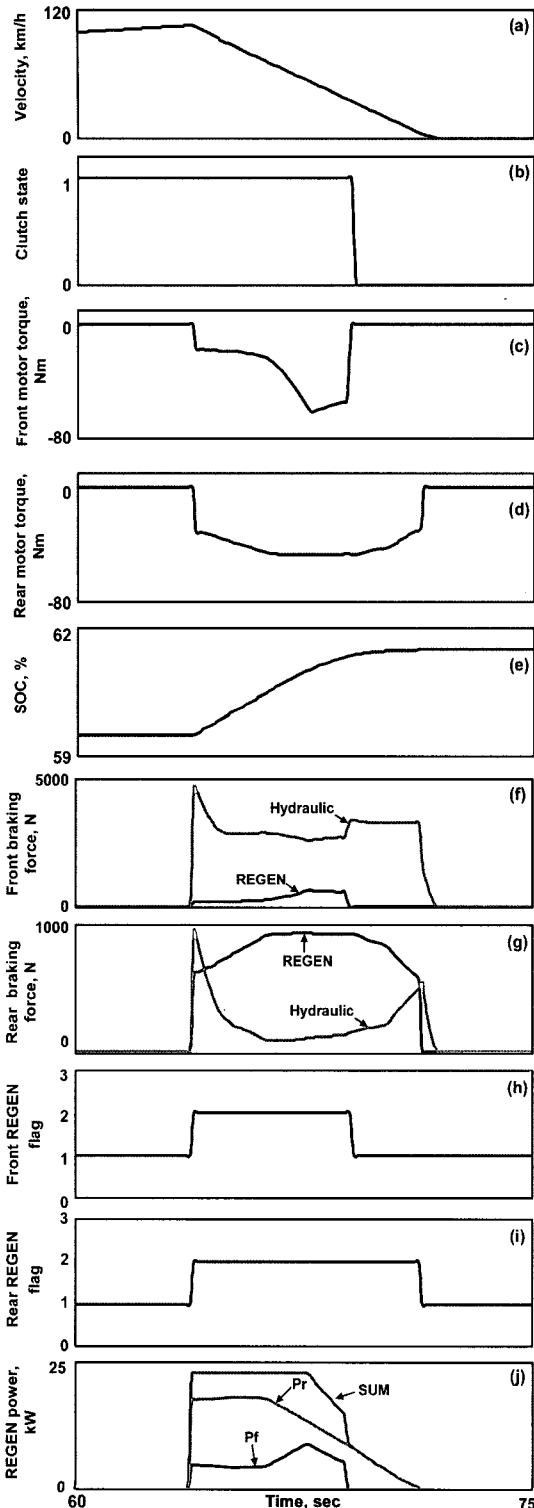


Fig. 12 Simulation results

회생제동력이 후륜의 회생제동력보다 작은 것을 볼 수 있는데(f, g) 이는 제동시 고단의 기어비 때문에 휠에 작용하는 회생제동토크가 작고 배터리의 충전 한계(23kW)를 초과하는 구간이 발생하여 전륜의 회생제동이 제한되었기 때문이다.

회생제동 모드를 나타내는 REGEN flag(h, i)에서 볼 수 있듯이 클러치가 해제됨에 따라 전륜의 회생제동이 중단되며 후륜은 클러치 해제에 관계없이 차량속도가 저속이 될 때까지 회생제동을 수행한다. (j)는 전륜과 후륜의 회생제동 파워를 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전·후륜의 회생제동 파워합이 23kW를 넘지 않도록 회생제동을 제한한 구간이 약 4초간 발생하며 제시된 회생제동 제한로직에 의하여 전·후륜의 파워의 합이 23kW를 초과하지 않도록 전륜의 회생제동이 제한된다.

회생제동에 의한 에너지 회수효과를 고찰하기 위하여 FUDS(federal urban driving schedule)에 대한 시뮬레이션을 수행하고 구동에너지, 전·후륜의 회생제동 에너지를 비교하였다(Fig. 13). 전륜과 후륜의 회생제동 에너지의 합은 약 1700kJ로 FUDS 주행모드의 전체 제동에너지(2700kJ)의 63%가 회생제동으로 회수되었다. 나머지 37%의 에너지는 유압제동에 의한 마찰과 모터시스템의 효율에 의한 손실에 의하여 소모된다.

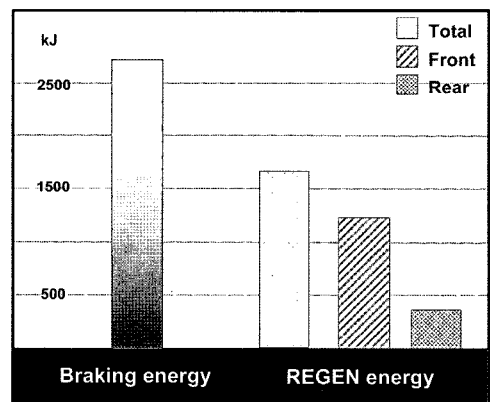


Fig. 13 Simulation results of the regenerative braking energy (FUDS)

Fig. 14는 FUDS 주행시 전륜과 후륜의 모터 운전점을 도시한 것이다. 전륜 모터속도는 1500~

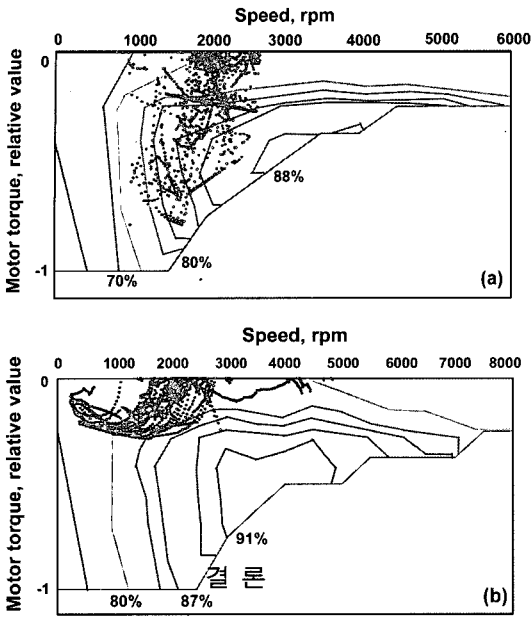


Fig. 14 Operation trajectory for (a) front and (b) rear motor

2500rpm에서 주로 운전되며 최대 회생제동 토크는 약 -63Nm로 모터효율이 78~87% 영역에서 운전되는 것을 볼 수 있다. 후륜 모터 속도는 300~2700rpm에서 주로 운전되며 최대 회생제동토크는 -25Nm로 대부분 85%이하의 저효율 영역에서 운전된다. 이는 후륜의 높은 중감속 기어비(6.5)로 인하여 0.41g의 감속속도까지 후륜에서 회생제동이 가능하기 때문이다. 제동이 급제동을 제외한 대부분의 제동시 후륜모터는 저효율 구간에서 운전되고 불리한 요소로 작용된다. 따라서 중감속 기어비를 낮추면 회생제동시에는 후륜모터의 운전영역을 보다 효율이 높은 영역으로 이동시킬 수 있으나, 구동시에는 구동토크의 저하를 초래하기 때문에 구동성과 회생제동 성능을 고려한 중감속 기어비의 선정이 필요하다.

5. 결론

- 1) 4WD HEV에서 수동변속기의 변속기어비와 전·후륜 모터효율 특성을 고려하여 회생제동 토크의 크기를 결정하는 알고리즘을 제시하였다.
- 2) 배터리 충전 파워 및 유압제동력 특성을 고려한 회생제동 제어로직을 제안하였다. 배터리 충전 한계파워를 넘는 경우 전륜의 빈번한 클러치 접

속 해제로 인한 회생제동토크의 변동을 방지하기 위하여 전륜의 회생제동을 제한하고 회생제동이 급격히 증가하는 경우 유압제동의 상대적으로 느린 응답성능으로 인한 이질적인 제동감을 방지하기 위하여 모터의 응답성능을 유압모듈의 응답성능과 유사하도록 제어하는 방안을 제시하였다.

- 3) 4WD HEV 회생제동 성능 시뮬레이터를 개발하고 시뮬레이션을 통하여 제시된 회생제동 제어 로직의 성능을 평가하였다. 연구대상 전·후륜 독립 모터방식 4WD HEV에서 후륜 모터의 운전은 감속기어비에 의존하며 전륜모터에 비하여 상대적으로 효율이 낮은 영역에서 회생제동이 이루어진다. 시뮬레이션 결과 FUDS 주행모드에서는 연구대상 HEV는 제안된 회생제동 로직에 의하여 전체 제동에너지의 약 63%를 회수할 수 있는 것을 확인하였다.

References

- 1) K. Yasuhiro, K. Hideo, I. Hiroki and O. Takayuki, "Development of New Generation Hybrid System," SAE 2004-01-0643, 2004.
- 2) E. Nakamura, M. Soga, A. Sakaki, A. Otomo and T. Kobayashi, "Development of Electronically Controlled Brake System for Hybrid Vehicle," SAE 2002-01-0900, 2002.
- 3) O. Hidehiro, Y. Akihiro, K. Hiroshi and K. Kensuke, "Development of a Hybrid Powertrain System Using CVT in a Minivan, SAE 2002-01-0991, 2002.
- 4) F. A. Wyczalek and T. C. Wang, "Regenerative Braking Concepts for Electric Vehicle - A Primer," SAE 920648, 1992.
- 5) Y. Gao, L. Chen and M. Ehsani, "Investigation of the Effectiveness of Regenerative Braking for EV and HEV," SAE 1999-01-2910, 1999.
- 6) T. Yaegashi, S. Sasaki and T. Abe, "Toyota Hybrid System : It's Concept and Technologies," FISITA F98TP095, 1998.
- 7) H. Yeo and H. Kim, "Hardware-in-the-loop Simulation of Regenerative Braking a Hybrid Electric Vehicle," Proc. Instn. Mech. Engrs,

Vol.216, pp.855-864, 2002.

- 8) H. Yeo, C. Song, C. Kim and H. Kim,
“Hardware in the Loop Simulation of Hybrid

Electric Vehicle for Optimal Engine Operation
by CVT Ratio Control,” Int. J. Automotive
Technology, Vol.5, No.3, pp. 201-208, 2004.