

버스용 병렬형 하이브리드 동력전달계의 개발 (VI) 제 6 편 : 하이브리드 동력전달계용 자동화 변속기의 변속 질 향상을 위한 변속 제어 알고리즘의 개발

A Development of Parallel Type Hybrid Drivetrain System for Transit Bus Part 6 : A Development of Shift Control Algorithm for Improving the Shift Characteristics of the Hybrid Drivetrain with AMT

조성태*, 전순일*, 조한상*, 박영일**, 이장무*
Sung Tae Cho, Soon Il Jeon, Han Sang Jo, Yeong Il Park, Jang Moo Lee

ABSTRACT

In this study, a shift control algorithm for improving the shift quality of a parallel hybrid drivetrain with an automated manual transmission (AMT) is proposed. The general AMT requires the sophisticated control of clutch in the clutch engagement to improve its shift characteristics, and that is generally known to be difficult. But in this hybrid drivetrain, we can control the speeds of clutch plates by engine and motor control, and it provides the easier clutch control in shift process than general AMT. Additionally, it permits the much-reduced shift shock. The motor control during the shift period is also to achieve reduced velocity drop of the vehicle in comparison with that of a general AMT. Furthermore various dynamometer-based experiments are carried out to prove the validity of the proposed shift control algorithm.

주요기술용어 : Parallel Type hybrid drivetrain(병렬형 하이브리드 차량), automated manual transmission(자동화 변속기), Shift control algorithm(변속 제어 알고리즘), Shift characteristics(변속 특성)

1. 서론

병렬형 하이브리드 차량에서 연비 극대화 및 배기가스 배출을 최소화하기 위해서는 자동화된 변속장치를 장착하여 엔진, 전동기, 변속기의 통합적인 제어를 행하는 것이 필수적이다.

현재까지 개발된 자동화된 변속장치로는 자동 변속기, 벨트식 무단변속기, 그리고 자동화 변속기를 들 수가 있다. 그러나 중대형 차량의 경우에는 요구 부하 용량으로 인하여 아직까지는 벨트식 무단 변속기의 적용이 어려우며 자동 변속기도 토크컨버터로 인한 많은 동력 손실을 피할 수 없다는 단점이 있다. 이 중 자동화 변속기는 기존의 수동변속기의 클러치, 변속레버

* 회원, 서울대학교

** 회원, 서울산업대학교

등에 유압 또는 공압 액츄에이터를 부착하여 변속 및 클러치 조작을 자동화 한 것으로 자동 변속기에 비하여 비교적 작은 노력으로 개발이 가능하고, 효율이 높다는 장점이 있으나 자동 변속기만큼의 변속 질을 구현하기가 어렵다는 단점이 있다. 그러나 중대형 차량의 경우는 승차감에 대한 중요도가 소형 승용 차량에 비해 크지 않다는 점에서, 효율 면에서 유리한 자동화 변속기가 주로 장착될 것이 예상된다.

본 연구에서는 버스용 하이브리드 동력전달계에 적용될 자동화 변속기를 구성하고 그 변속 특성을 향상시킬 수 있는 변속 제어 알고리즘을 제시하였다. 변속시 전동기와 엔진의 적절한 제어를 통하여 미세한 클러치 제어 및 변속 레버 제어를 하지 않고도 성공적인 변속과 변속 충격의 저감을 이루었다. 제시된 변속 제어 알고리즘의 검증은 위하여 자동화 변속기를 포함한 실험장치를 제작하였으며, 실험을 통하여 변속 충격의 저감 및 부드러운 변속이 이루어지는 것을 확인하였다.

2. 자동화 변속기를 포함하는 하이브리드 동력전달계

2.1 자동화 변속기를 포함하는 하이브리드 동력전달계의 구성

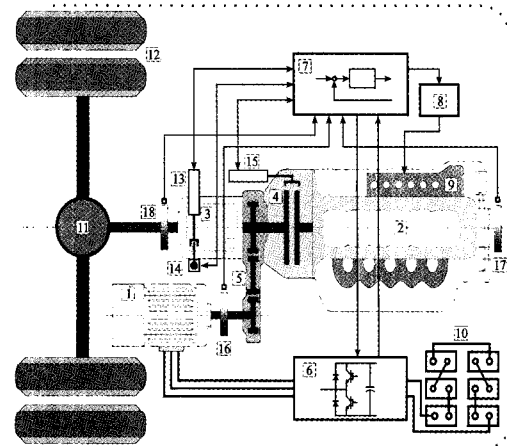
기존의 버스용 동력전달계에 전동기, 인버터, 동력 연결기구 및 각종 센서와 액츄에이터를 부가하여 하이브리드 동력전달계를 구성하였다.

Fig. 1, 2는 개발된 병렬형 하이브리드 동력전달계의 세부 사항 및 개략도를 나타내고 있다.

2.2 제어기

전체 하이브리드 동력전달계의 동작을 결정하는 제어기는 TI사의 TMS320C31 DSP를 이용하여 구성하였다. 실험에 사용된 제어기내에는 변속을 위한 변속로직과 주행시 동력분배를 위한 동력분배비 알고리즘¹⁾이 내장되어 엔진/전동기의 속도 및 토크제어를 담당하고 있다.

Fig. 3, 4는 하이브리드 동력전달계용 제어기



- | | |
|---|----------------------|
| 1. induction machine | 2. diesel engine |
| 3. transmission | 4. clutch |
| 5. power connection device | 6. inverter |
| 7. main controller | 8. throttle actuator |
| 9. electric fuel injector | 10. battery |
| 11. differential gear | 12. wheels |
| 13-15. x-axis, y-axis, clutch pneumatic actuator | |
| 16-18. saw-tooth wheel for ω_{mot} , ω_{eng} , ω_{veh} | |

Fig. 1 Schematic diagram for parallel type hybrid drivetrain

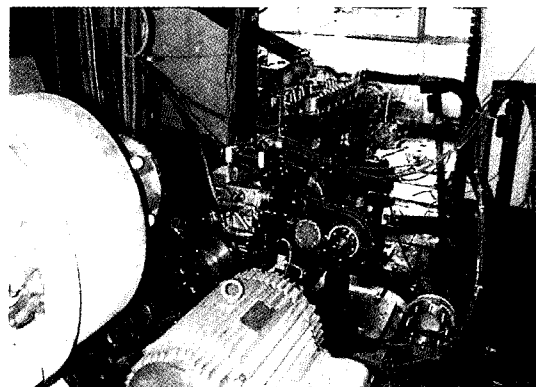


Fig. 2 Photo of hybrid drivetrain test bed

의 기능과 그 세부 사항을 나타내고 있다.

2.3 엔진 출력 제어 시스템

하이브리드 동력전달계에서는 각각의 동력원이 최적의 효율에서 작동하도록 이들을 제어해야 하므로 엔진과 전동기의 제어가 필수적이다. 본 실험장치에서 전동기에 대한 제어에서는 여

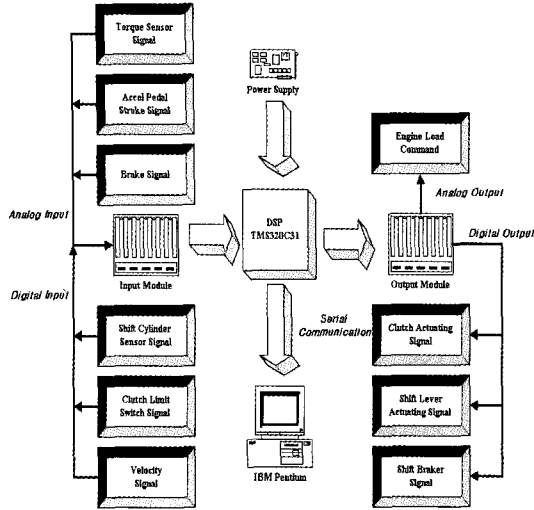


Fig. 3 Schematic diagram of main control unit

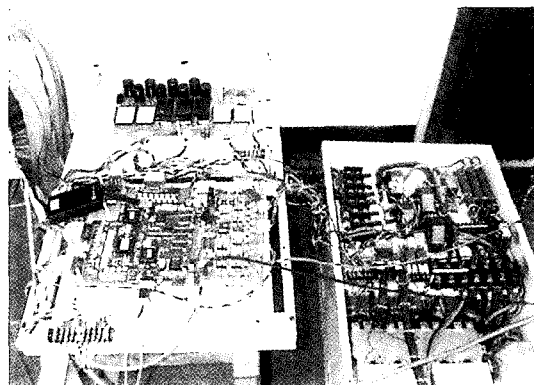


Fig. 4 Photo of main controller and inverter

러 연구에서 적용되었고 성능이 검증된 벡터 제어 기법을 사용하였으며²⁾ 엔진의 제어를 위해서는 스로틀 개도를 기계적으로 움직여 제어할 수 있는 시스템을 개발하였다. 이전 연구에서 사용된 DC Motor 시스템의 경우 가격적인 면에서 유리하고 구성이 간단하다는 장점이 있으나 별도의 위치센서가 필요하고 외란에 약하다는 단점이 있다.²⁾ 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 스텝모터를 이용한 엔진제어 시스템을 적용하였다.

Fig. 5는 스텝모터를 이용한 엔진 출력제어 시스템의 개요도이다.

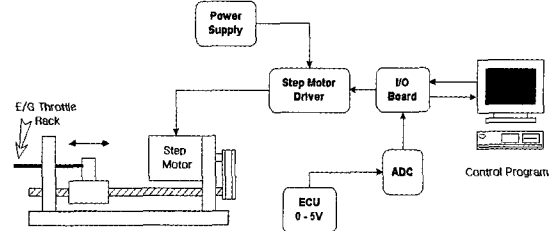


Fig. 5 Schematic diagram of engine torque control system using step motor

3. 변속 제어 알고리즘 개발

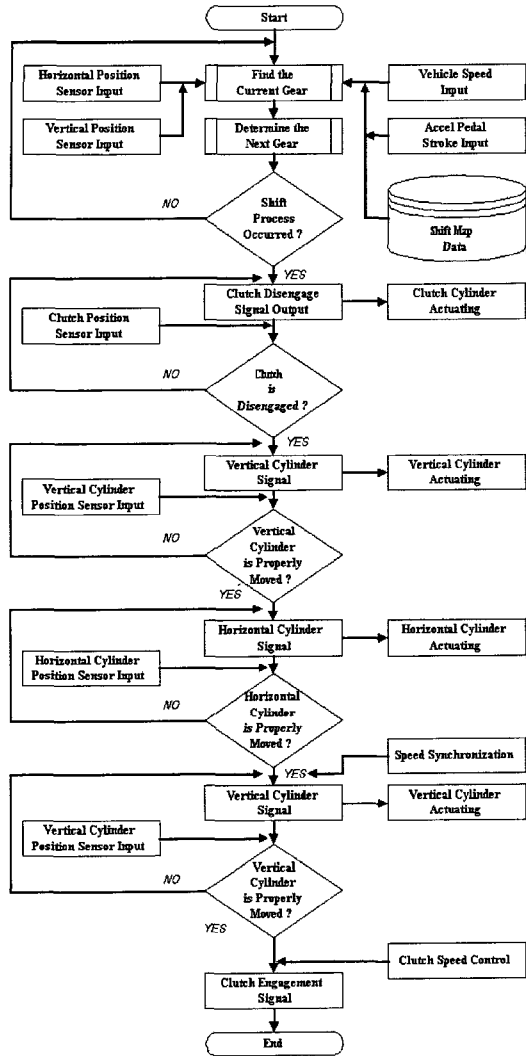
3.1 기본 변속 제어 알고리즘

자동화 변속기에 적용된 기본적인 변속 알고리즘의 순서도를 Fig. 6에 나타내었다. 변속과정을 간단히 요약하면 다음과 같다.

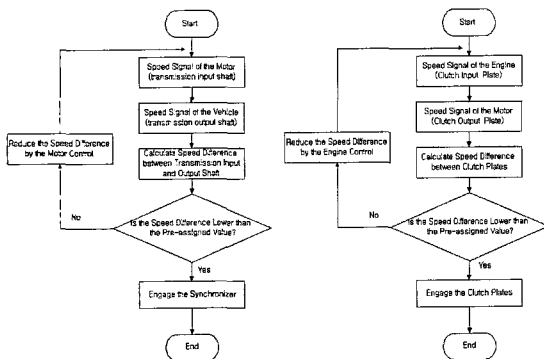
- 1) 변속 시점이라 판단되면 클러치를 분리하며 동시에 엔진/전동기의 출력을 0으로 제한한다.
- 2) 수평방향 변속 실린더를 움직여 기어를 중립으로 이동시킨다. 이동이 끝나면 전동기를 이용하여 싱크로나이저 속도제어를 하여 싱크로나이저 양단의 속도 차를 목표 값 이하가 되도록 한다.
- 3) 속도제어가 끝나면 수직방향 변속 실린더를 움직여 기어를 다음 단으로 변속시킨다.
- 4) 1-3까지의 과정으로 싱크로나이저의 결합이 끝나게 되며 이후 클러치 결합을 위해 엔진을 이용한 속도제어를 수행한다.
- 5) 클러치 입력 단의 속도를 클러치 출력 단의 속도를 추종하도록 엔진을 이용해서 속도제어를 수행하며, 양단의 속도 차가 목표 값 이하가 되면 클러치를 결합시킨다.

Fig. 7(a)는 4단에서 3단으로의 변속 예를 도식적으로 나타낸 것이며, 2→3단 변속의 경우는 3번과정에서 수직방향 실린더가 변속 레버를 중립에 놓은 후 4번 과정에서 수직방향 실린더가 변속레버를 3단으로 이동시키게 된다.

Fig. 7(b)는 수평/수직 방향의 변속 실린더에 의해 변속레버가 이동되는 방향을 도식적으로 표현하고 있다.

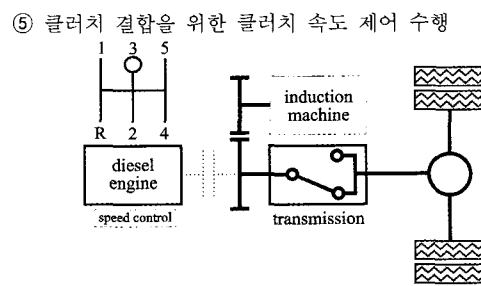
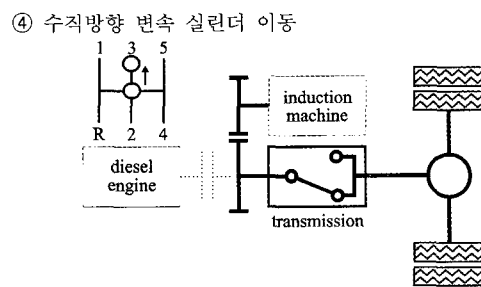
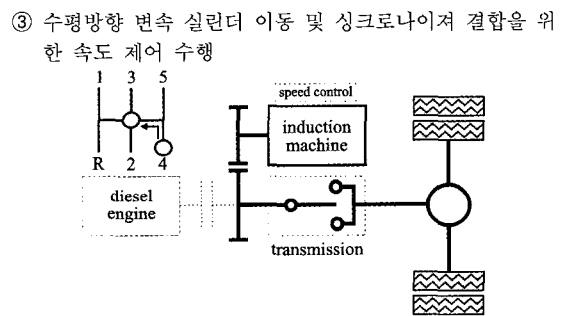
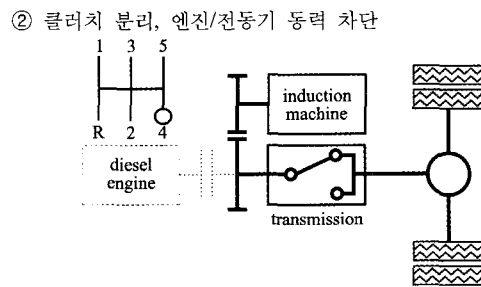
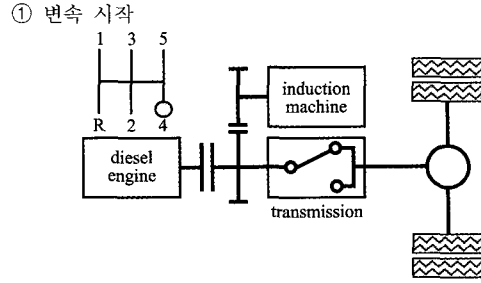


(a) Whole control algorithm

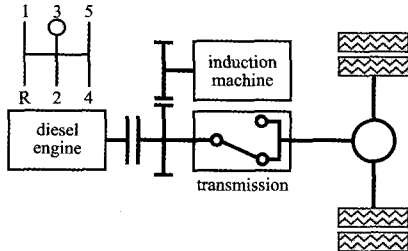


(b) Speed control of sync. (c) Speed control of clutch

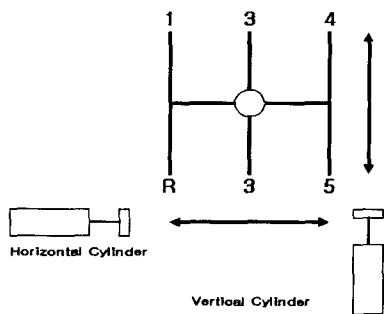
Fig. 6 Flowchart of primary shift control algorithm



⑥ 클러치 결합 후 변속 종료



(a) Shift sequence of AMT (4→3 downshift)



(b) Movement of Shift lever by horizontal and vertical cylinder

Fig. 7 Schematic diagram of shift action.

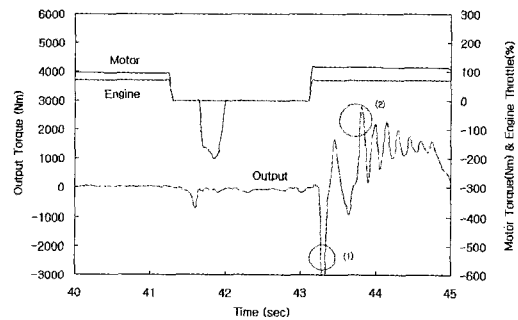
3.2 기본 변속 제어알고리즘이 적용된 변속 실험

본 연구의 하이브리드 동력전달계에는 하이브리드 모드, 엔진 모드, 전동기 모드의 세 가지 주행모드가 있다. 이 중 하이브리드모드와 엔진 모드의 경우 변속시의 동력원의 사용이나 제어 기법 등이 같으므로 동일한 변속 특성을 보이게 되고, 전동기 모드의 경우는 클러치의 결합, 분리 과정이 없으므로 변속시의 충격이 거의 없다.³⁾ 따라서 본 논문에서는 하이브리드 모드에서의 변속 특성을 중점적으로 실험하였다. 또한 일반적으로 변속 특성은 저 단에서 많은 문제점을 가지게 되고, 특히 본 연구 대상 차량과 같은 중/대형 차량에 있어서는 2단 이상의 기어 비를 주로 사용하게 되므로 2↔3 단의 상하단 변속을 주 실험대상으로 정하였다. Fig. 8, Fig. 9는 위의 변속 제어 알고리즘을 적용하여 얻어진 상/하단 변속실험의 결과이다.⁴⁾

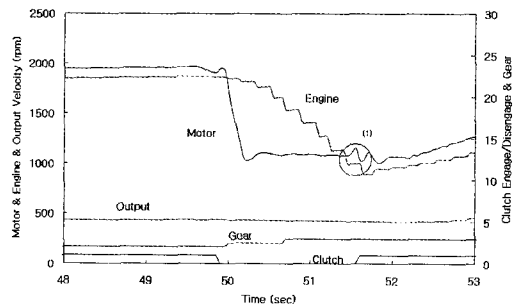
실험 결과 상단 변속의 경우 클러치가 결합되는 순간과 변속 종료 후 동력원의 토크가 다시 발생하는 시점에서 큰 과도 토크가 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 클러치 결합시, 음의 방향으로 과도 토크가 발생하는 것을 볼 수 있으며, 이는 클러치 결합시의 결합 조건 및 속도 제어 알고리즘 때문으로 생각된다.(Fig. 8 (a)-(1))

변속종료 후 과도토크가 발생하는 것은(Fig. 8(a)-(2)) 변속 종료후의 토크 환원 알고리즘의 문제인 것으로 생각된다. 즉, 변속시에는 운전자의 모든 입력이 무시되고 제어기에 의하여 토크 제어가 수행되다가 변속 후 다시 운전자의 토크 지정 값대로 출력을 제어하므로 순간적으로 큰 출력 토크의 변화가 생기게 되기 때문이다.

클러치 결합시 원활한 결합을 위해서는 클러치 양단의 속도 차를 일정 속도 내로 줄여야 한다. 이를 위해서 엔진의 속도 제어를 행하여



(a) Torque (upshift)



(b) Velocity (upshift)

Fig. 8 Experimental result 1 (ref. 200rpm engagement)

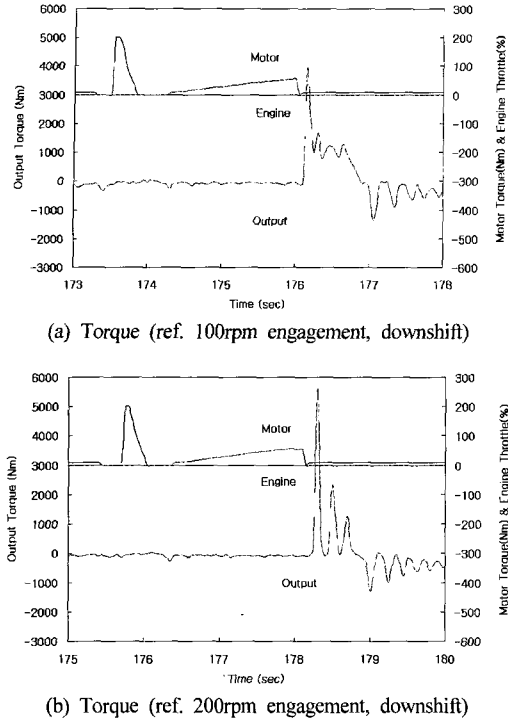


Fig. 9 Experimental result 2

엔진측 클러치 판의 속도를 조절하게 된다. 그러나 엔진의 반응이 늦음으로 인해 전체 변속 시간이 길어지는데 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.(Fig. 8-(b))

Fig. 9는 클러치 결합시 클러치 양단의 속도 차가 변속 충격에 주는 영향을 나타낸다. 200 rpm 이하의 속도에서 결합하도록 한 결과가 100 rpm 이하의 속도에서 결합하도록 한 결과에 비해 훨씬 큰 변속 충격을 보여주고 있다.

이상의 초기 실험에서 나타난 문제점을 열거 하면 다음과 같다.

- 1) 클러치 결합시, 엔진측 클러치의 속도가 낮은 상태에서 결합이 일어나면 음의 과도 토크가 나타나게 된다.
- 2) 변속 종료 직후 과도한 변속 충격이 나타나는데, 이는 변속 후 동력 환원 알고리즘의 문제로 생각된다.
- 3) 변속시 변속 충격의 크기는 클러치 양단의 속도 차가 커질수록 증가하게 된다.

4) 변속시 엔진의 응답 지연으로 인한 변속 시간이 길어지는 문제가 있다. 변속중에는 모든 동력이 차량 축으로부터 단절되므로 변속 시간이 길어지면 차속이 점차 감소되는 문제가 생기게 되며 이는 승차감 및 가속 성능에 악영향을 끼치게 된다.

4. 개선된 변속 알고리즘에 의한 변속 특성의 향상

3.1절에서 제시된 문제점을 해결하기 위하여 시뮬레이션을 통한 이론적 해석과 실험결과를 바탕으로 기본 변속 알고리즘을 수정하였으며 그 결과를 실험으로 확인하였다.

4.1 변속 직후 생성되는 과도 토크의 저감

기본 변속 알고리즘에서는 변속 직후, 제어기가 동력원들의 목표 토크 값을 운전자의 요구

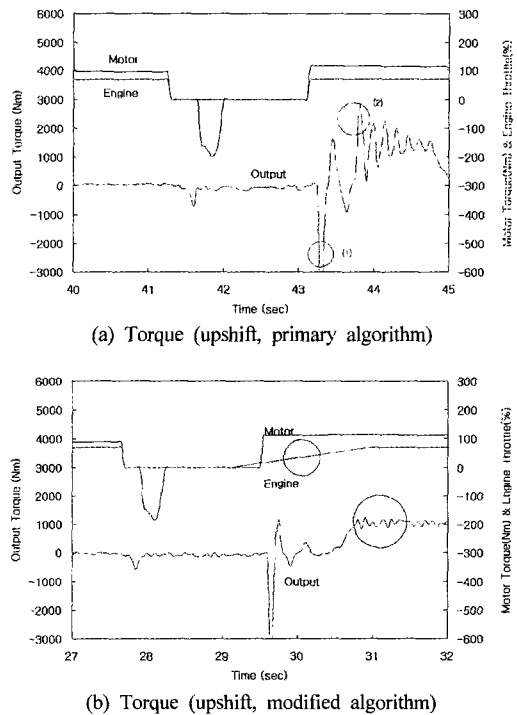


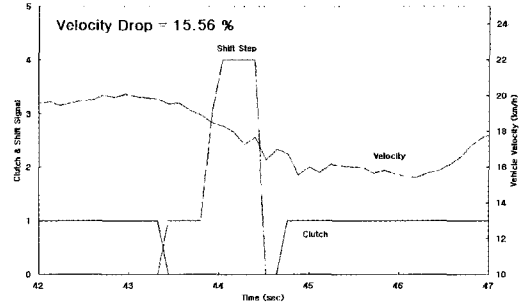
Fig. 10 Experimental results of reducing transient torque at the end of the shift process

값으로 즉시 환원하게 되므로 변속 후 큰 과도 변속 충격이 나타나는 문제가 있다.(Fig.10-(a)) 이러한 문제점을 해결하기 위해서 수정된 변속 알고리즘에서는 변속 종료시 엔진/전동기 출력 제어신호를 운전자의 지령 값으로 환원할 때 2 초의 시간간격을 두고 선형적으로 환원시키게 하였다. 변속 종료 후 나타나던 과도 토크가 크게 줄어든 것을 알 수 있다.(Fig.10-(b))

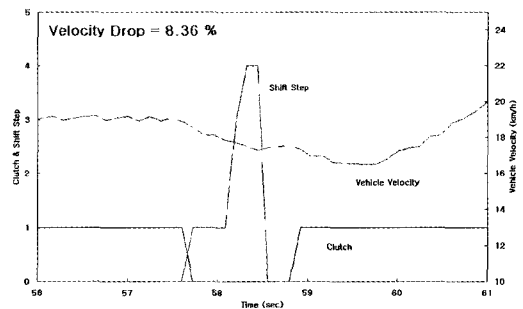
그러나 이러한 제어전략은 차량의 가속 성능에 안 좋은 영향을 끼칠 가능성이 있다. 차량의 가속 성능에 최소화의 영향을 주면서 변속 과도 충격을 최대한으로 줄이기 위해서 추후의 연구에서는 최적 제어이론 등이 적용될 예정이다.

4.2 변속 중 차량 속도 유지 알고리즘

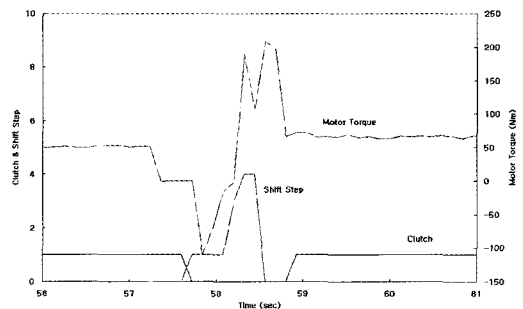
본 연구에 적용된 AMT는 일반 AMT와는 달리 클러치 슬립 제어를 하지 않고, 엔진/전동기를 이용하여 클러치 양단의 상대 속도 차를 제어하는 방식을 사용하므로 엔진의 응답 지연 때문에 변속 시간이 길어지는 문제점이 있다. 변속 중에는 동력이 단절되기 때문에 변속 시간이 길어지면 운전자가 느끼는 승차감의 저하가 커지게 된다. 이를 개선하기 위하여 클러치 결합을 위하여, 엔진제어를 수행하고 있는 동안 전동기를 이용하여 차량이 변속 이전의 속도를 추종하도록 알고리즘을 수정하였다. 제어 기법으로는 PI 제어를 사용하였으며, 제어 이득들은 이론적인 해석을 통하여 정한 후 실험을 반복해서 실시하여 구한 값으로 결정하였다. 또한 변속 이전의 가속도를 추정하는 것이 가장 이상적인 방법이나 이는 고성능의 전동기를 필요로 하므로 본 연구에서는 변속 이전의 속도를 추종하도록 하였다. Fig. 11은 변속시 전동기를 이용한 속도유지알고리즘이 적용된 실험 결과이다. 싱크로나이저가 분리되는 구간에서는 각 동력의 단절이 필연적이므로 차량축의 속도가 감소되나 싱크로나이저가 결합된 이후는 전동기의 토크가 작용하여 출력 속도를 일정하게 유지 시켜주는 것을 알 수 있다.



(a) Velocity (primary algorithm)



(b) Velocity (modified algorithm)



(c) Torque (modified algorithm)

Fig. 11 Experimental results of maintaining vehicle velocity during the shift

4.3 시뮬레이션을 통한 클러치 결합 조건의 개선

$$I_e \ddot{\theta} = T_e - T_e \quad (1)$$

$$I_c \ddot{\theta}_c = T_c - T_c \quad (2)$$

$$a^2 I_m \ddot{\theta}_i + I_i \ddot{\theta}_i = T_k + a T_m - T_5 - \frac{1}{\eta} T_g \quad (3)$$

$$I_{co} \ddot{\theta}_{co} = -T_g + T_{g1} + T_{g2} + T_{g3} + T_{g4} \quad (4)$$

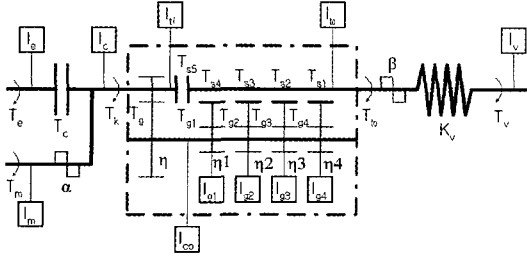


Fig. 12 Mathematical modeling of the test bed

$$I_{g1} \ddot{\theta}_{g1} = \eta_1 T_{g1} - T_{s1} \quad (5)$$

$$I_{g2} \ddot{\theta}_{g2} = \eta_2 T_{g2} - T_{s2} \quad (6)$$

$$I_{g3} \ddot{\theta}_{g3} = \eta_3 T_{g3} - T_{s3} \quad (7)$$

$$I_{g4} \ddot{\theta}_{g4} = \eta_4 T_{g4} - T_{s4} \quad (8)$$

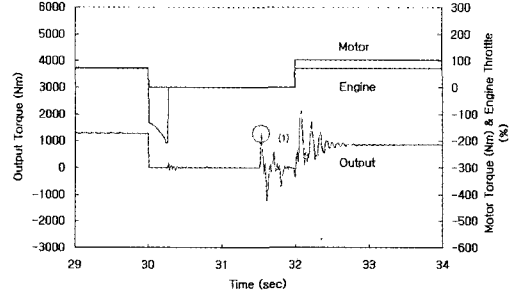
$$I_v \ddot{\theta}_v = T_{out} - T_v \quad (9)$$

$$I_{to} \ddot{\theta}_{to} = T_{s1} + T_{s2} + T_{s3} + T_{s4} + T_{s5} - \frac{1}{\beta} T_{out} \quad (10)$$

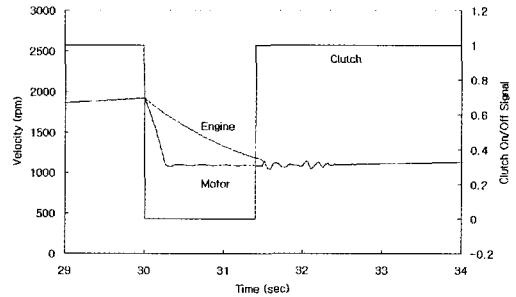
$$T_{out} = \frac{K_v}{\beta} \theta_o - K_v \theta_v \quad (11)$$

변속시 클러치 결합 조건의 개선을 위하여 하이브리드 동력 전달계를 수학적으로 모델링하여, 다양한 클러치 결합 조건에 대한 변속 동특성을 시뮬레이션하였다. Fig. 12는 하이브리드 동력전달계 실험장치의 수학적 모델링을 보여주고 있다. 전체 시스템은 등가의 관성, 강성, 감쇠들로 모델링되었고, 엔진과 전동기는 실험에서 얻어진 각각의 토크 자료에 의한 외력으로 모델링하였다. 클러치 모델로는 스틱-슬립 클러치 모델을 채용하였다. 싱크로나이저는 변속 상태에 따라 두가지 상태를 가지도록 모델링되었다. 속도 동기화가 이루어지기 전까지는 클러치, 그 이후에는 기어와 같은 동특성을 가지도록 모델링하였다.

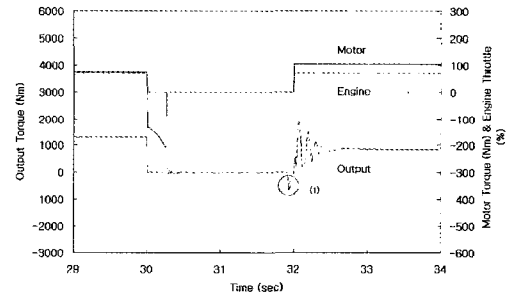
우선 클러치 결합 시의 클러치 양단의 속도차가 변속 충격에 미치는 영향을 살펴보고, 엔



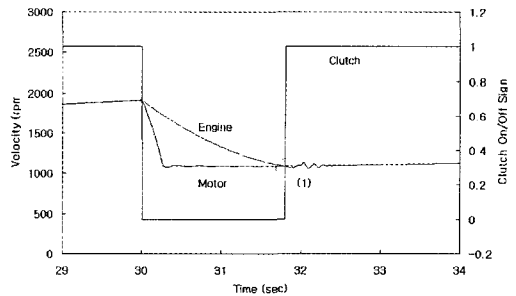
(a) Torque (ref. 100rpm engagement, engine)



(b) Velocity (ref. 100rpm engagement, engine)



(c) Torque (ref. 50rpm engagement, motor)



(d) Velocity (ref. 50rpm engagement, motor)

Fig. 13 Simulation results of various clutch engagement conditions

진 측에 연결된 클러치 판의 속도가 전동기 측에 연결된 클러치 판의 속도보다 높은 상태에

서 결합하는 것이 좋은 지를 확인하였다. Fig. 13-(a), (b)는 엔진측에 연결된 클러치 판의 속도가 높은 상태에서 클러치 양단의 속도 차가 100rpm 이내가 되었을 때 클러치를 결합하도록 한 결과이고, Fig. 13-(c), (d)는 엔진 측에 연결된 클러치 판의 속도가 낮은 상태에서 클러치 양단의 속도 차가 50rpm 이내가 되었을 때 클러치를 결합하도록 한 결과이다. Fig. 13-(a)에서는 클러치 결합시 양의 방향의 과도 토크가 발생하나 13-(c)에서는 음의 방향의 과도 토크가 발생함을 볼 수 있다. 또한 Fig. 13-(c)에서 발생하는 과도토크의 크기는 (a)의 경우에 비해 상당히 적음을 알 수 있다.

4.4 실험을 통한 클러치 결합 조건의 개선

4.3절의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 클러치 제어 알고리즘을 Fig. 14와 같이 개선하였다.

Fig. 15는 클러치 양단의 속도차가 변속 충격에 미치는 영향을 나타내고 있다. Fig. 15-(a)는 클러치 양단의 속도차가 100rpm 이내가 되도록 제어한 결과이고 (b)는 50rpm 이내가 되도록 제어한 결과이다. 개선된 변속 알고리즘의 결과에서 변속 충격이 상당히 줄어든 것을

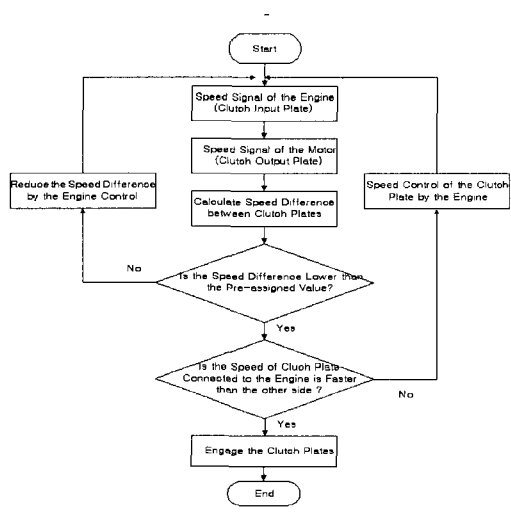
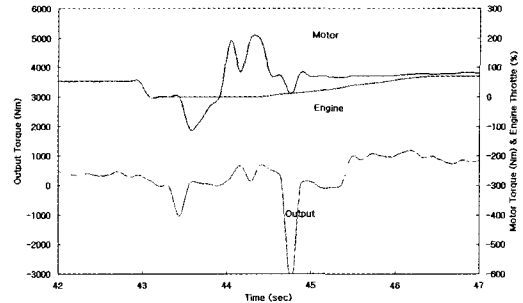
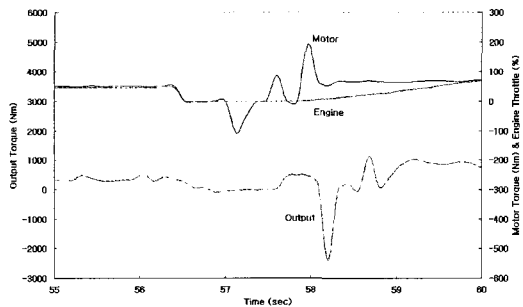


Fig. 14 Modified clutch control algorithm



(a) Torque (upshift, primary)



(b) Torque (upshift, modified)

Fig. 15 The influence of the speed difference between clutch plates - Experimental results

볼 수 있다. 그러나 클러치 결합시 음의 방향의 과도 충격은 여전히 남아 있음을 알 수 있다.

Fig. 16은 최종적으로 개선된 변속 알고리즘에 의한 변속 결과이다. Fig. 8의 기본 변속 알고리즘의 결과와 비교하면 변속 직후에 발생하는 큰 과도 변속 충격이 사라졌음을 알 수 있다. 클러치 결합시의 음의 방향의 변속 충격 또한 없음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 하이브리드 버스용 자동화 변속기의 변속 질을 향상시킬 수 있는 변속 제어 알고리즘을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 개발하였으며, 제시된 알고리즘의 타당성 및 변속 질의 향상정도를 자동화변속기가 포함된 하이브리드 동력전달계 실험장치를 구성하여 검증하였다. 이상의 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

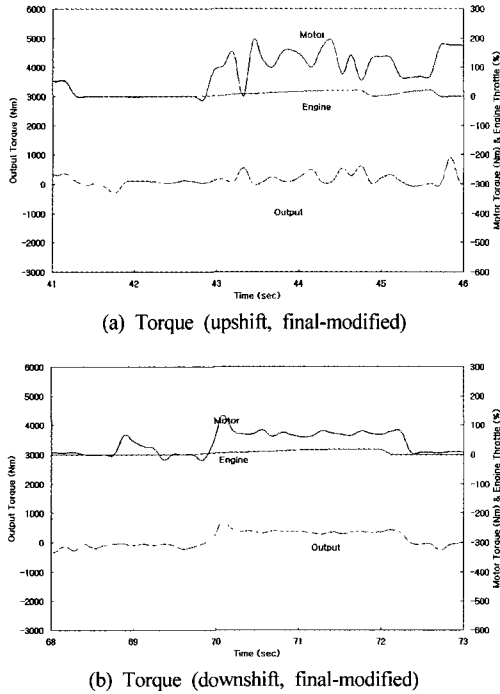


Fig. 16 The influence of the speed control of clutch plates with the engine - Experimental results

- 1) 클러치 결합시, 엔진측 클러치의 속도가 낮은 상태에서 결합이 일어나면 음의 과도 토크가 나타나게 되며, 이는 적절한 엔진제어를 통하여 없앨 수 있었다.
- 2) 변속 종료 후 동력원의 출력을 변속 전으로 급격히 환원함에 따라 과도한 충격이 나타나게 되며 이를 막기 위해서는 일정한 비율로 출력토크를 늘려가도록 엔진/전동기의 출력을

제어하는 것이 필수적임을 알 수 있었다.

3) 클러치 결합시 과도 변속 충격의 크기는 클러치 양단의 속도 차가 커질수록 증가하는 것을 확인하였고 엔진/전동기를 이용한 클러치 양단 속도의 제어를 통하여 과도 변속 충격을 저감할 수 있음을 알 수 있었다.

4) 상/하단 변속시 엔진의 응답 지연으로 인한 변속 시간이 길어지게 되며 이를 해결하기 위해서 엔진의 동력이 연결되기 전 전동기의 동력을 이용하여 이전 차량 속도를 유지시켜 줌으로서 운전자가 느끼는 가속도 저하를 최소한으로 유지하였다.

참고 문헌

- 1) 조성태, 전순일, 이장무, 박영일, 조한상, “병렬형 하이브리드 동력전달계의 성능 민감도 해석” 한국자동차 공학회 논문집, 게재예정.
- 2) S. K. Sul, et. al., “Advanced Control Strategy of Parallel Hybrid Low Emission Electric Vehicle”, IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation, Michigan 1996.
- 3) 조한상, 조성태, 이장무, 박영일, “자동화 변속기가 장착된 하이브리드 차량의 향상된 변속제어 알고리즘 개발”, 한국자동차 공학회 논문집 제7권 제5호, 1999.
- 4) R. Mizon and R. M. Tuck, “Automatic and Powershift Transmission for Trucks”, SAE 912486, 1991.