

차량 급가속시 운전성 향상을 위한 제어로직 개선에 관한 연구

A Study of the Control Logic Development of Driveability Improvement in Vehicle Acceleration Mode

최윤준*, 송해박*, 이종화**, 조한승***, 조남효***
Yoon-Joon Choi, Hai-Bak Song, Jong-Hwa Lee, Han-Seong Cho, Nam-Hyo Cho

ABSTRACT

Modern vehicles require a high degree of refinement, including good driveability to meet customer demands. Vehicle driveability, which becomes a key decisive factor for marketability, is affected by many parameters such as engine control and the dynamic characteristics in drive lines. Therefore, Engine and drive train characteristics should be considered to achieve a well balanced vehicle response simultaneously. This paper describes analysis procedures using a mathematical model which has been developed to simulate spark timing control logic. Inertia mass moment, stiffness and damping coefficient of engine and drive train were simulated to analyze the effect of parameters which were related vehicle dynamic behavior. Inertia mass moment of engine and stiffness of drive line were shown key factors for the shuffle characteristics. It was found that torque increase rate, torque reduction rate and torque recovery timing and rate influenced the shuffle characteristics at the tip-in condition for the given system in this study.

주요기술용어 : Tip-in(팁인), Gear stage(기어단), Drive train model(동력전달계 모델), Shuffle(셔플), Spark timing control logic(점화시기 제어로직)

Nomenclature

d : damping coefficient
I : Inertia Mass Moment
k : Stiffness
T : Torque
 θ : angular displacements
 $\dot{\theta}$: angular velocity
 $\ddot{\theta}$: angular acceleration

Subscripts

E : engine

1. 서론

최근 자동차 배기가스 규제의 강화, 환경 오염에 대한 관심의 고조와 더불어 엔진의 저공해, 고효율화 기술에 대한 요구가 크게 확대되고 있다. 이에 따라 자동차에서는 엔진의 상태를 최적으로 제어하기 위한 전자제어 시스템의 채용뿐만 아니라 동력 전달 및 변속에 관한 특성연구가 보편화되고 있다. 특히 동력발생과 직접적으로 발

* 회원, 아주대학교 대학원
** 회원, 아주대학교
*** 회원, 고등기술연구원

생되는 엔진 제어는 자동차에 대한 감성적 상품성, 즉 고품질감의 중요한 척도 및 출력, 효율, 배출물 특성에 중요한 영향을 미치며 엔진에서 발생하는 동력의 전달 및 변속제어는 엔진뿐만 아니라 변속기 그리고 이들의 조합으로서 구동력을 제어하는 시스템의 채용이 확대되고 있다.^{1,2)}

자동차 연구개발 과정에서 엔진과 변속기의 제어, 구동력 제어(traction control), 제동력 제어(anti-brake control) 시스템 등을 채용하기 위해서는 시스템의 성능에 영향을 주는 많은 변수들에 대한 제어 알고리즘 실험적 검토 및 확인 과정을 거쳐야 한다. 또한 이러한 시스템을 최적화하기 위해서는 자동차의 운전조건에 대한 각 변수의 영향을 파악하여 이들의 값을 적절히 선정해야 한다. 특히 운전중에 빈번하게 발생하는 급가속, 급감속시 발생하는 차량의 응답특성은 운전성 및 상품성에 직접적인 영향을 미치므로 차량 개발단계부터 세심한 주의가 필요하다. 그러나 양산 이전단계에서 실제 차량에 동일한 시험차량(proto car)을 제작하여 이러한 일련의 과정을 수행하기에는 많은 시간과 노력이 요구되며 개발과정에서도 설계 변경 및 운전조건 변화에 따라 매번 동일한 실험을 반복해야 하는 문제점이 있다.

차량의 제어시스템에 대한 연구개발시 실험에서의 시행착오 횟수, 개발기간 및 비용을 줄이기 위한 수단에는 시스템 구성 부품의 일부 하드웨어를 소프트웨어로 대체하고 연구 개발하고자 하는 일부의 제어시스템 혹은 하드웨어의 성능을 예측해 보는 방법이 있다. 차량의 운전 조건별 (엔진 회전수, 기어단수, 엔진 부하)에 따라 급가속, 감속시 발생하는 톱인(Tip-in)/톱아웃(Tip-out) 과도 응답 현상을 파악하고 이 현상을 근거로 일부 시스템을 소프트웨어로 대체함으로써 개선된 제어로직의 개발이 가능할 것이다. 또한 이의 적용은 차량의 과도상태에서 발생하는 부조화된 응답현상을 저감시키게 되며 소비자들의 운전성 개선에 크게 기여할 것이다.³⁻⁵⁾ 이와 같은 목적의 시스템을 구성하기 위해서는 하드

웨어 부분에 대한 모델링 및 이를 모사하는 프로그램이 필요하다.

본 연구에서는 차량의 응답 특성에 관한 실험 결과를 근거로 차량의 과도응답 상태의 점화시기 제어로직을 개선하기 위하여 동력전달계에 대한 단순 모델을 구성하였다. 단순 모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 기어 2단, 3단 조건에서 톱인 경우, 시뮬레이션 결과와 응답 특성에 대한 실험결과를 비교하였다. 점화시기의 진각/후퇴에 따른 토크 변동 효과를 프로그램의 입력자료로 처리하여 새로운 점화시기 제어로직을 제시하고자 한다.

2. 차량 거동 예측 모델링

시뮬레이션 방법에는 참고문헌^{6,7)}에 나타낸 것처럼 비선형적인 수학 모델을 이용하여 모사하는 방법도 있으나 본 연구에서는 셔플(shuffle) 등의 저주파 특성에 관한 차량 응답특성에 관한 문제에는 참고문헌⁸⁾과 같은 단순화된 모델이 적합하다고 판단하였다.

Fig. 1은 단순화된 구동계 진동 모델을 나타낸 그림이다. 그림에서 I_1 은 엔진과 플라이 휠, I_2 는 미션기어, 디퍼렌셜, 프로펠러 등, I_3 은 타이어와 차체 등을 나타낸다. 각 부분을 연결하는 부분을 비틀림 진동계로 치환하여 모델화하였다. 모델에서 운동방정식을 세우면 다음과 같다.

$$I_1 \ddot{\theta}_1 + d_1(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + k_1(\theta_1 - \theta_2) = T_E \quad (1)$$

$$I_2 \ddot{\theta}_2 + d_1(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + d_2(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) + k_1(\theta_2 - \theta_1) + k_2(\theta_2 - \theta_3) = 0 \quad (2)$$

$$I_3 \ddot{\theta}_3 + d_2(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2) + k_2(\theta_3 - \theta_2) = -T_{tractive} \quad (3)$$

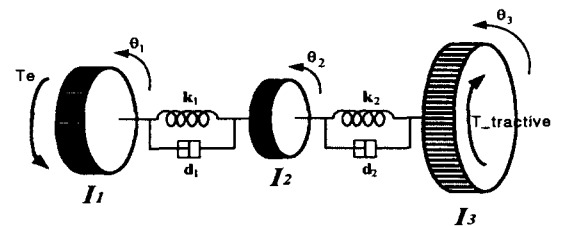


Fig. 1 Simplified drive train model

식에서 T_E 는 엔진에서 발생된 토크로 가진력으로 작용하였고, $T_{tractive}$ 는 차량 주행시 차륜에 작용되는 주행저항으로 차량속도의 이차식으로 쓰여진 함수식을 사용하였다.

식(1)에서 식(3)까지 나타낸 모델을 이용하여 기어 2단과 3단에서의 차량 응답특성 시뮬레이션을 수행하였다. Table 1은 각 기어에서 모델에 사용한 초기조건과 상수 값들이다. 엔진과 동력 전달부의 회전관성값은 참고문헌⁹⁾에서 언급한 실험 측정값들을 사용하였다. 본 연구에서는 실차량에서 변속기부와 차륜부와의 회전관성을 구분하여 측정할 수 있는 방법이 어렵기 때문에

Table 1 Initial value, inertial mass moment, stiffness, damping coefficient in model

| | 2nd gear | 3rd gear |
|----------------------------------|--|--|
| Initial angular velocity (rad/s) | $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3=115$ | $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3=150$ |
| $I_1(kg \cdot m^2)$ | 0.19 | 0.19 |
| $I_2(kg \cdot m^2)$ | 0.07 | 0.01 |
| $I_3(kg \cdot m^2)$ | 2.0 | 2.06 |
| $k(Nm/rad)$ | 182 | 255 |
| $k_2(Nm/rad)$ | 136 | 190 |
| $d_1(Nms/rad)$ | 0.4 | 0.5 |
| $d_2(Nms/rad)$ | 0.4 | 0.5 |

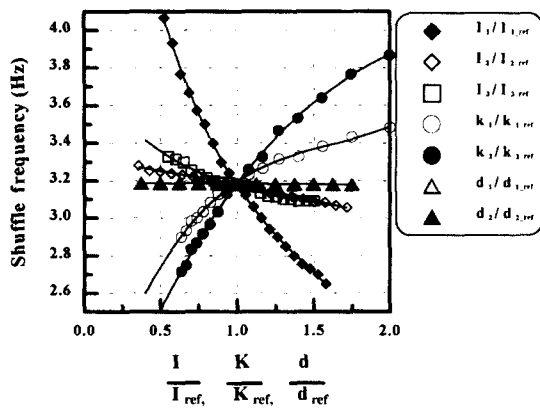


Fig. 2 Effects of inertial mass moment, stiffness, damping coefficient on shuffle frequency at 2nd gear

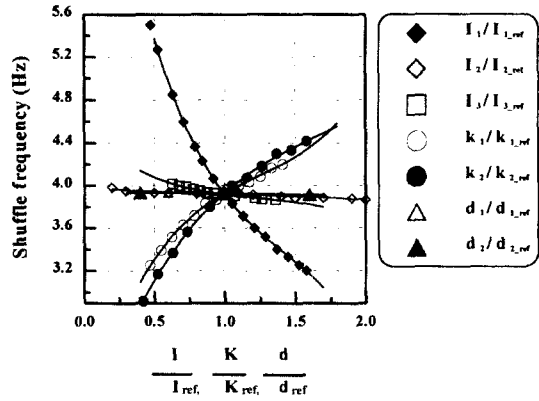


Fig. 3 Effects of inertial mass moment, stiffness, damping coefficient on shuffle frequency at 3rd gear

실험을 통하여 측정한 동력전달부의 회전관성값을 각각 적용하였으며 각 회전관성이 시스템

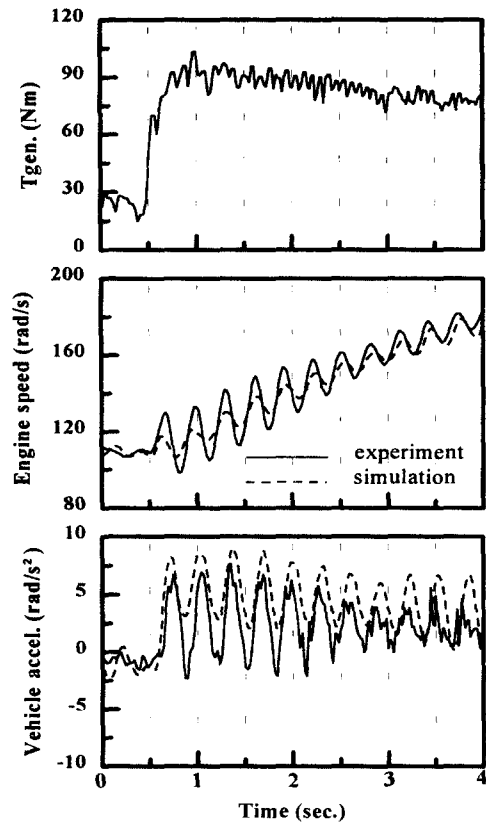


Fig. 4 Comparison between simulation results and experiment results for 0→10% tip-in at 2nd gear

특성에 미치는 영향을 조사하여 실험값을 사용하였다.

Fig. 2는 기어 2단에서 모델내 각 인자들이 서플 특성의 주파수(frequency)에 미치는 영향을 시뮬레이션하여 나타낸 것이다. 엔진부의 회전관성, I_1 과 동력전달계의 강성도(stiffness), k_2 가 상대적으로 주파수 변화에 가장 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이와 같은 인자들의 민감도에 대한 시뮬레이션 결과를 이용하여 실제 실험 결과를 가장 잘 모사하는 인자의 값을 사용하였다.

Fig. 3은 기어 3단에서 시뮬레이션시 각 모델링 인자들이 서플 특성의 주파수에 미치는 영향을 나타낸 것이며 2단에서 수행한 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 관련 인자들 중에서 엔진부의 회전관성 변화와 동력전달계의 강성도 변화가

큰 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 실험에서 측정된 토크값을 시뮬레이션 프로그램 입력으로 사용하여 기어 2단에서 엔진의 회전각속도와 차량의 가속도를 시뮬레이션한 결과와 실험 측정결과를 비교한 것이다. 토크에 대해 다르게 나타나는 진동경향을 실험결과와 비교하면 절대값 측면에서 차이는 있지만 전반적인 시간에 따라 변화하는 경향은 시뮬레이션 결과가 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 인자들의 민감도에 대한 예측 결과를 근거로 기어 3단에서의 시뮬레이션에 입력할 인자의 값을 선정하였고 전반적으로 시험결과를 모사하는 결과를 얻었다. Fig. 6과 Fig. 7은 기어 3단에서 각기 다른 팁인 조건에서 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다.⁹⁾

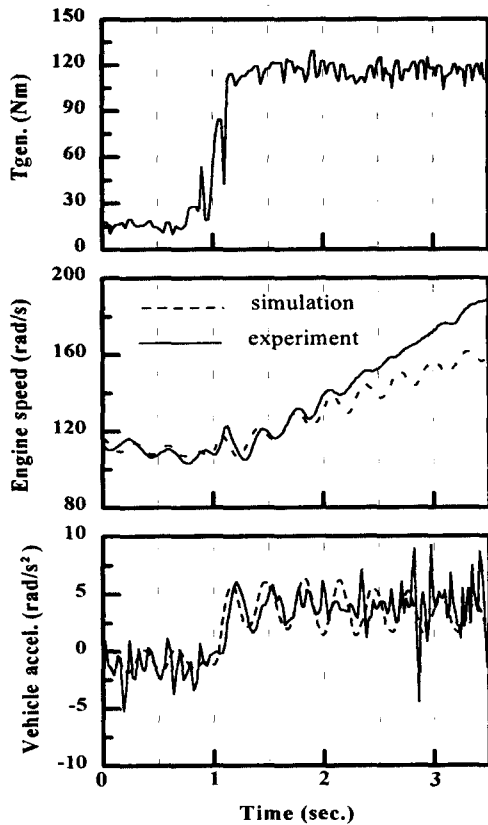


Fig. 5 Comparison between simulation results and experiment results for 0→30% tip-in at 2nd gear

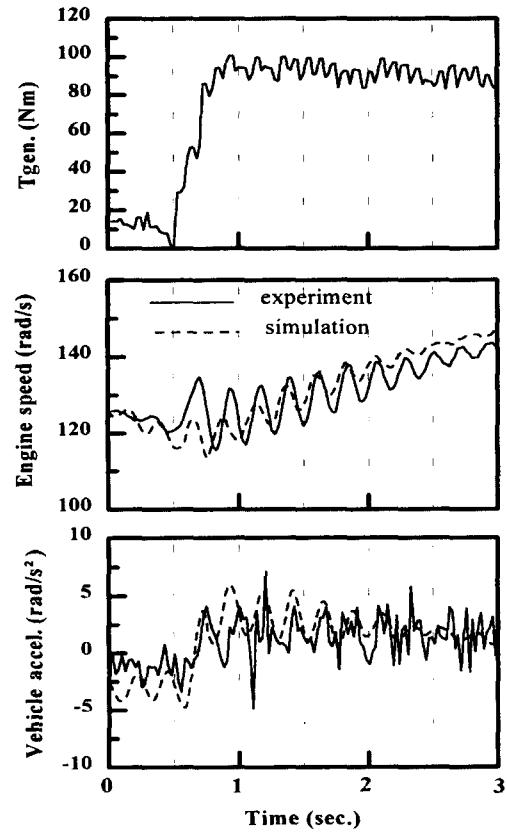


Fig. 6 Comparison between simulation results and experiment results for 0→10% tip-in at 3rd gear

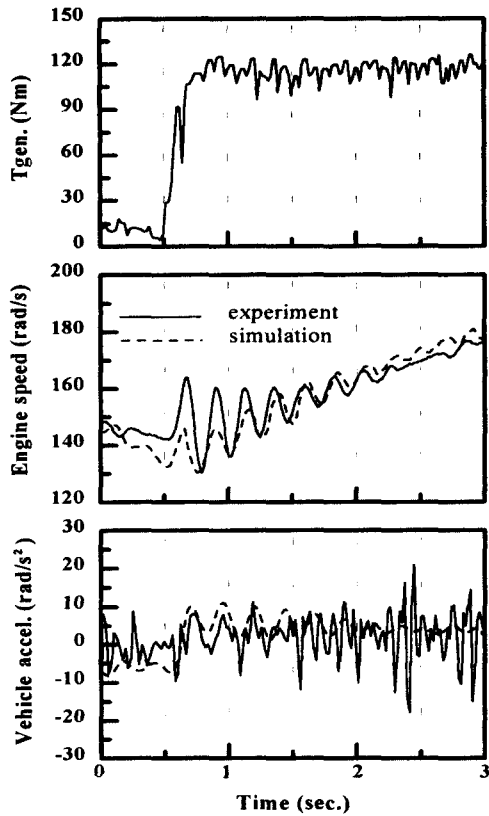


Fig. 7 Comparison between simulation results and experiment results for 0→30% tip-in at 3rd gear

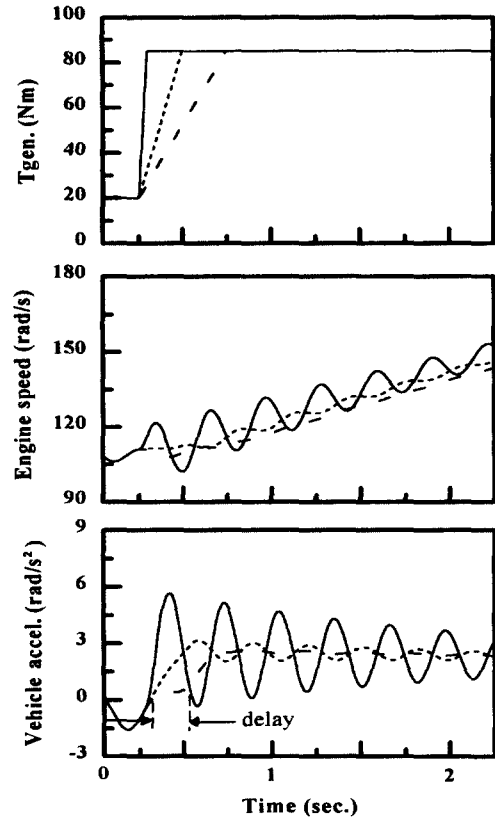


Fig. 8 The effect of torque increase rate on the shuffle characteristics

3. 시뮬레이션을 통한 개선 방안

Fig. 8은 각각 서로 다른 기울기를 가지는 입력 토크에 대한 차량의 응답특성을 시뮬레이션 한 결과이다. 기어는 2단으로 고정하고 주행상태에서 트로틀 밸브의 각도를 0→30% 팁인 조건으로 시뮬레이션 한 결과이다. 토크가 급격히 발생할수록 진동이 심해지는 것을 알 수 있으며 이 결과는 참고문헌⁹⁾의 팁인 실험결과의 경향과 잘 일치하는 것이다. 그림에서 실선으로 나타나는 토크발생 기울기를 입력으로 모사한 경우는 차량의 셔플 특성이 상대적으로 심하고, 토크발생 기울기가 완만한 경우인 넓은 점선으로 나타낸 경우에는 응답 지연 후 차량이 가속되기 시작하였으므로 차량의 응답성 측면에서 바람직하지 못하다고 볼 수 있다. 따라서 운전성과 응답성 측면

에서 잘 조화된 최적화된 토크발생 기울기가 존재함을 알 수 있으며 엔진 제어 측면에서 적절한 기울기로 토크를 제어한다면 이러한 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단한다.

Fig. 9는 토크가 발생한 경우 엔진 제어를 통해 토크를 단계적으로 증가시킴으로서 셔플의 발생특성을 제어하는 것을 나타낸 것이다. 토크를 단계적으로 증가함으로써 진동하는 폭이 상대적으로 감소하였으며 시간이 흐를수록 빠르게 감쇠하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

팁인 과정에서 토크가 발생한 후 점화시기를 제어함으로써 토크의 기울기 및 경향에 대한 영향이 셔플 특성에 미치는 정도를 시뮬레이션하였다. Fig. 10은 현재 시험 차량에 적용되어 있는 로직으로 엔진 회전가속도의 변화에 따라 가속

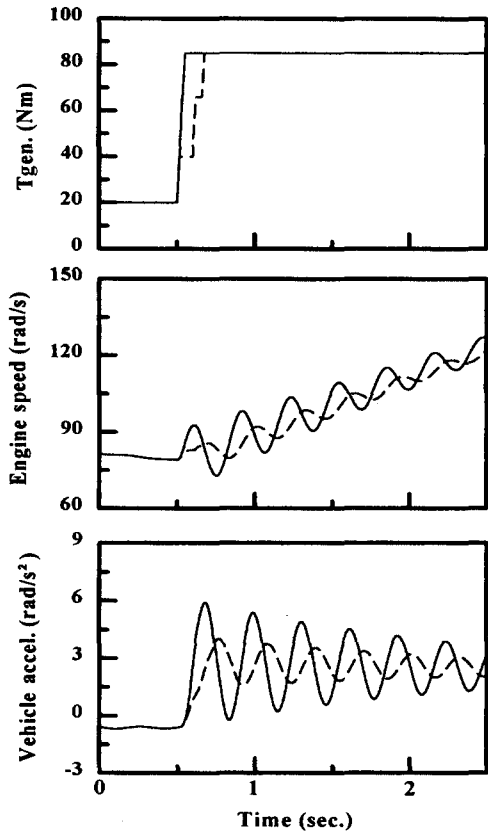


Fig. 9 The effect of any torque control on the shuffle characteristics

도가 점선으로 나타낸 절대치 임계값 이상으로 증가할 때 점화시기를 후퇴하여 토크를 감소시키고 엔진속도가 양의 기울기에서 음의 기울기로 변화할 때 다시 점화시기를 진각시켜 토크를 제어하는 것을 시뮬레이션으로 모사한 것이다. 점화시기를 제어하지 않은 경우에 비해 상대적으로 진동폭이 적어지고 감쇠가 일찍 일어남을 알 수 있다. 그러나 차량가속도를 보면 초기에 과도하게 토크를 감소시킴에 따라 음의 가속도 성분이 증가되는, 즉 속도가 감소하는 현상이 발생하였다. 이러한 현상이 지나치게 클 경우에는 멈칫거림 등의 운전성이 저하되는 문제를 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 현재 제어로직에 적용되고 있는 점화시기 조정을 통한 토크 제어로직에서 토크가

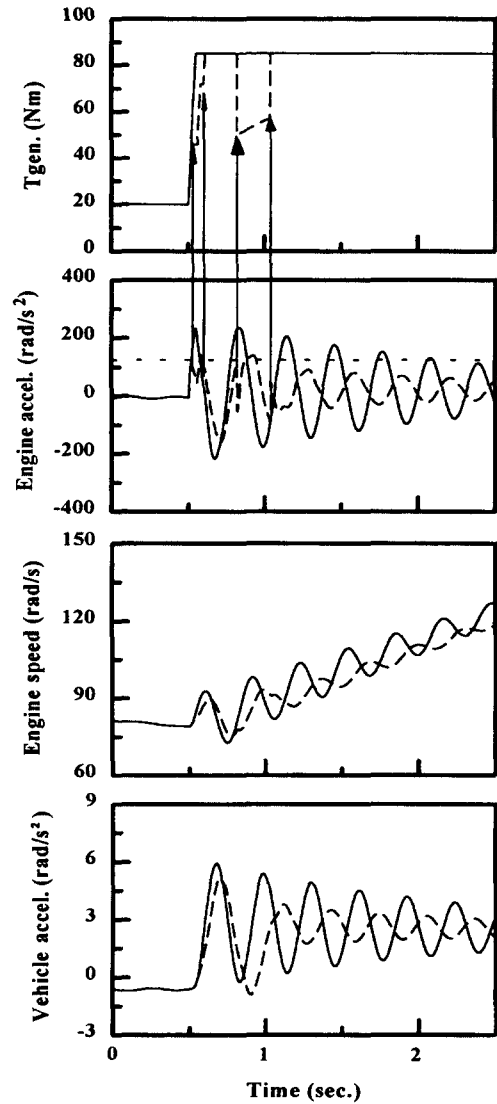


Fig. 10 The effect of current spark timing control logic on the shuffle characteristics

회복되는 시기를 바꾸어 적용한 것이다. Case A는 엔진의 회전속도가 음의 최대값을 가질 때 토크를 회복시킨 경우이고, Case B는 가속도가 음의 값으로 전환될 때를 가리킨다. Case C는 가속도가 음의 최대값을 지난 후에 토크를 회복시킨 경우에 해당된다. 여기서 토크가 회복되는 시기가 차량의 셔플 특성에 많은 영향을 미치며, 현재 제어로직에서 엔진회전 가속도가 음의 최대

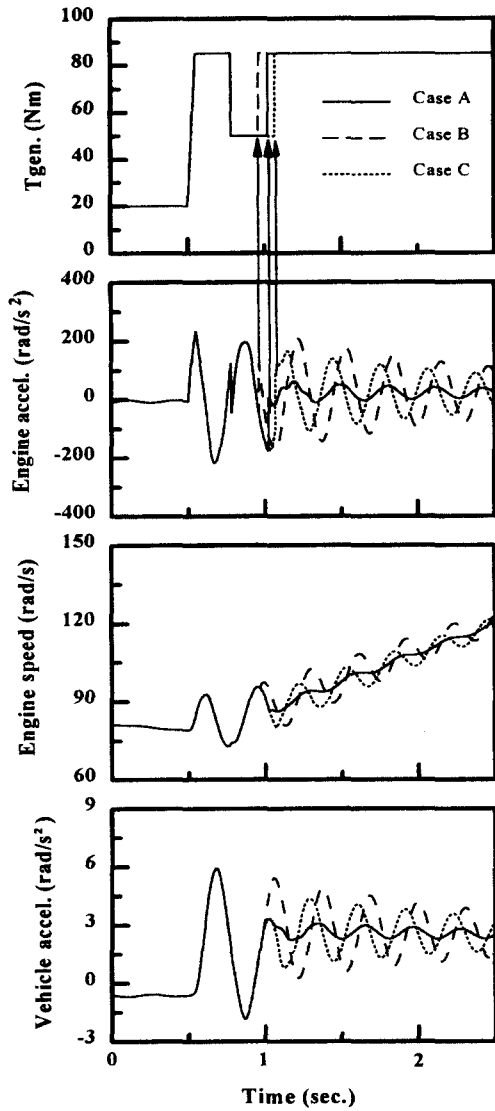


Fig. 11 The effect of torque recovery timing control logic on the shuffle characteristics

값을 가질 때 점화시기 진각을 통해 토크를 회복시키는 것이 상대적으로 가장 나은 방법임을 알 수 있다.

Fig. 12는 토크 제어시기를 Fig. 11에서 정한 임의의 시기로 고정하고 토크의 감소하는 정도만을 변화시켜서 그 영향을 시뮬레이션 한 결과를 나타낸 것이다. 발생토크에 대한 감소하는 토크의 비를 α 라고 정의하고 표현하면 식(4)와 같

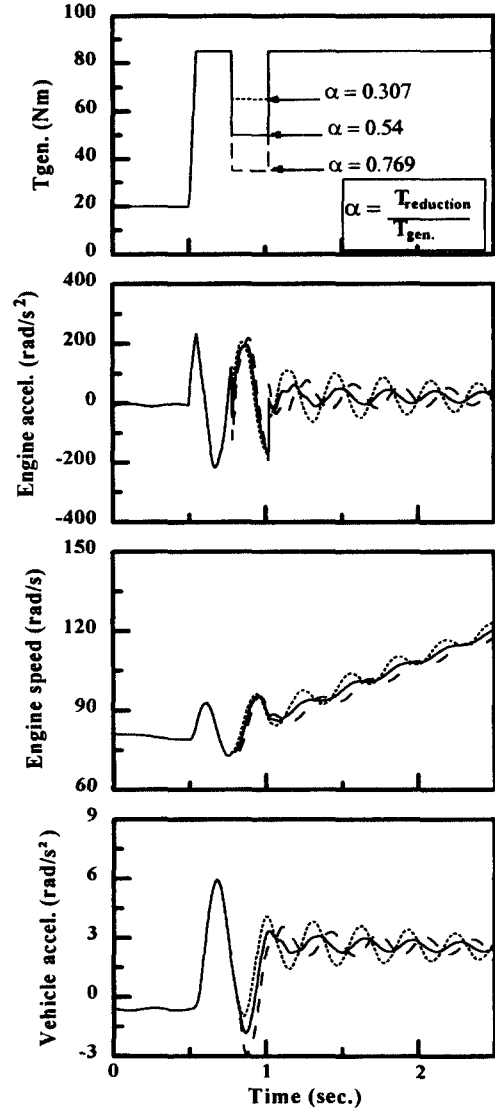


Fig. 12 The effect of torque reduction rate on the shuffle characteristics

다. 서플의 특성을 바람직한 방향으로 유도하기 위한 적절한 토크감소량이 있음을 알 수 있었으며 발생 토크에 대하여 $0.54 \leq \alpha \leq 0.68$ 인 범위에서 토크 감소량을 선정할 때 가장 적절한 서플 특성을 나타내었다.

Fig. 13은 토크를 회복시킬 때 회복되는 기울기의 영향을 알아본 결과이다. 토크를 완만하게 회복시키는 것이 상대적으로 바람직한 결과를

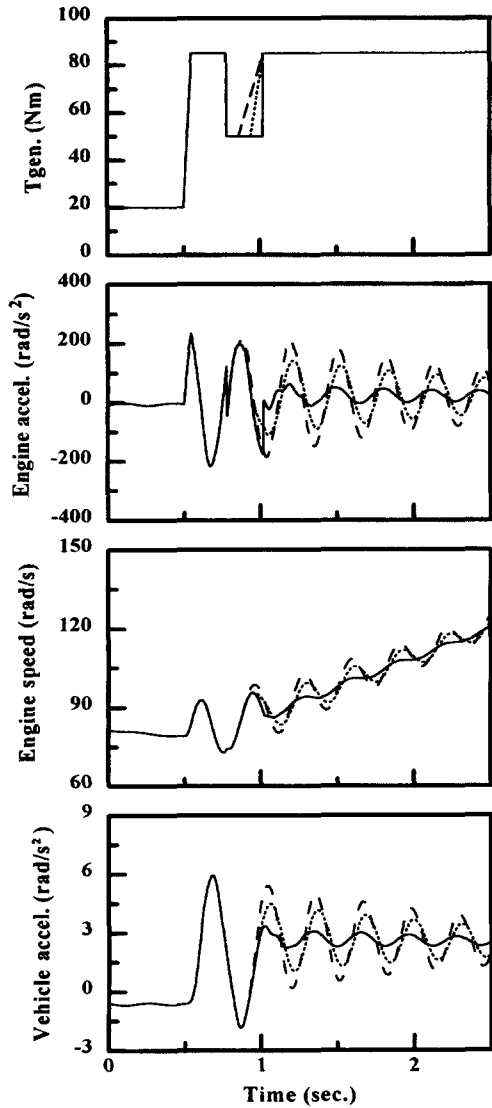


Fig. 13 The effect of torque recovery rate on the shuffle characteristics

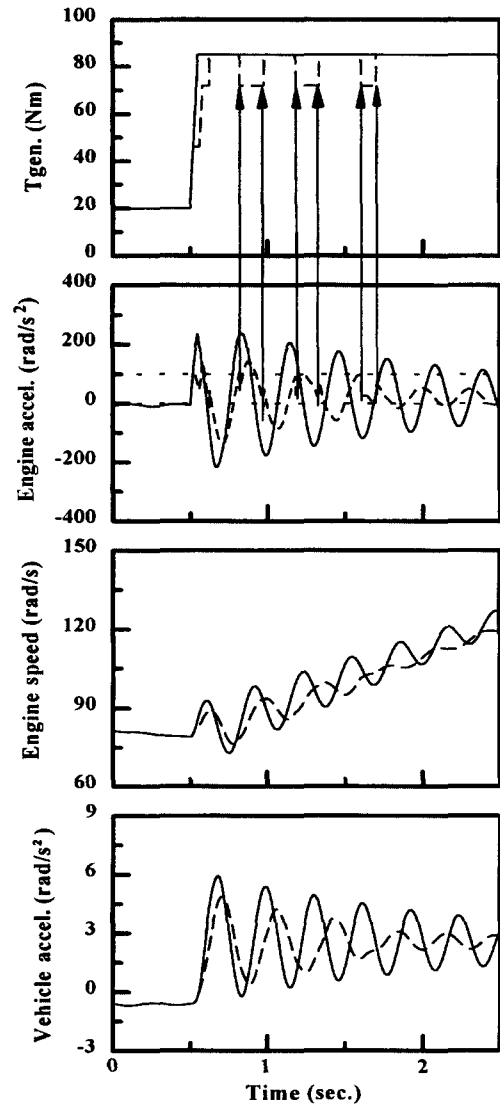


Fig. 14 The effect of modified control logic on the shuffle characteristics

나타낼 것으로 예측하였으나, 적절한 시기에 토크를 급격히 회복하는 것이 효과가 큰 것으로 나타났다.

Fig. 14는 지금까지 제어로직 변경에 따른 시뮬레이션 결과를 근거로 새로운 점화시기 제어로직을 구성하여 그 영향을 분석한 것이다. 엔진 회전가속도의 변화에 따라 가속도가 음의 값을 넘어설 때 점화시기를 진각시켜 토크를 증가시

키고 양의 임계값 이상일 때 다시 후퇴시켜 토크를 제어하는 방식으로 변화하는 경향을 예측해 보았다. 현재의 제어로직에 비해 증가, 감소시키는 토크의 절대치를 상대적으로 감소하여 적용하였다. 전반적으로 셔플 주파수 특성이 느려졌으며 엔진 회전속도의 시뮬레이션 결과를 보면 현 제어로직을 적용한 경우에 비해 진동폭도 훨씬 줄었음을 알 수 있다. 차량가속도를 살펴보면

초기의 속도가 감소하는 현상은 발생하지 않았으며 진동 주파수가 느려졌음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 기어 2단, 3단 상태에서 주행시 톱인 조건에서의 차량의 운전성을 개선하기 위한 점화시기 제어로직 구성을 동력전달계에 대한 단순 모델을 이용하여 연구하였다. 점화시기의 진각/후퇴에 대한 토크 변동을 시뮬레이션 프로그램의 입력항으로 처리하여 엔진 속도 및 차량의 가속도 변화 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 동력전달계 모델을 구성하는 인자들의 영향을 분석한 결과, 엔진의 회전관성과 동력전달계의 강성도가 서플 주파수 특성에 미치는 영향이 상대적으로 큼을 알 수 있었으며 참고문헌⁹⁾에서 서플 등의 진동특성이 엔진의 관성부분의 영향에 민감하게 반응한 실험 결과와 일치하였다.

2) 인체가 2-5Hz 정도의 진동주파수에 민감하지만 그 이상의 주파수 영역에서는 감도가 저하한다는 참고문헌³⁾의 연구결과를 참조하여 시스템의 강성도를 변화시켜서 시스템 고유 진동주파수를 바람직하지 않는 영역에서 벗어나게 한다면 운전자가 느끼는 차량진동을 개선하는 결과를 가져올 수 있을 것으로 판단한다.

3) 트로틀 밸브를 급히 열었을 경우, 토크의 증가를 단계적으로 하는 경우가 초기의 응답 지연 효과를 줄이면서 서플 주파수 특성을 바람직한 방향으로 유도할 수 있었다. 트로틀 밸브가 열린 상태에서는 점화시기 진각/후퇴에 따른 토크의

감소비율을 $0.54 \leq \alpha \leq 0.68$ 범위에서 선택하는 것이 바람직한 결과를 얻었으며 회복시기를 빠르게 함으로써 시간에 따른 차량의 가속도 변동폭이 감소하였다.

참 고 문 헌

- 1) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, 1987.
- 2) J. J. Moskwa, "Automotive Engine Modeling for Real Time Control," M.I.T. Department of Mechanical Engineering, Ph. D. Thesis, 1988.
- 3) H. O. List, P. Schoegg, "Objective Evaluation of Vehicle Driveability," SAE 980204, 1998.
- 4) J. W. Biermann, A. Reitz, T. Schumacher, "The Clonk Phenomenon - A Load Change Reaction to be Balanced in Terms of Comfort and Engine Response," KSAE International Journal of Automotive Technology, Vol.1, No.1, 2000.
- 5) C. Y. Mo, A. J. Beaumont, N. N. Powell, "Active Control of Driveability," SAE 960046, 1996.
- 6) A. Douaud, P. Eyzat, "DIGITAP - An On-Line Acquisition and Processing System for Instantaneous Engine Data-Application," SAE 770218, 1977.
- 7) D. R. Lancaster, R. B. Krieger, J. H. Lienesch, "Measurement and Analysis of Engine Pressure Data," SAE 750026, 1975.
- 8) M. F. J. Brunt, A. L. Emtage, "Evaluation of IM-EP Routines and Analysis Errors," SAE 960609, 1996.
- 9) 최윤준, 송해박, 이종화, 조한승, 조남효, "차량 급가속시 운전성 개선을 위한 실험적 연구," 한국자동차공학회논문집, 제9권 제6호, pp. 65-75, 2001.