

가솔린 엔진 장착 차량에서 과도구간 제어특성을 고려한 연비주행모드 시뮬레이션

정 연 식^{*1)} · 박 진 일¹⁾ · 이 종 화¹⁾ · 박 경 석²⁾

아주대학교 기계공학부¹⁾ · 금오공과대학교 기계공학부²⁾

The Simulation of Fuel Economy Considering Transient Control Condition in a Gasoline Engine Vehicle

Yeonsik Jung^{*1)} · Jinil Park¹⁾ · Jonghwa Lee¹⁾ · Kyoungseok Park²⁾

¹⁾Automotive Powertrain System Lab, Ajou University, Gyeonggi 442-749, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk 730-701, Korea

(Received 14 January 2008 / Accepted 12 March 2008)

Abstract : Modern vehicles require a high degree of refinement, including good drive ability to meet customer demands. Vehicle drive ability, which becomes a key decisive factor for marketability, is affected by many parameters such as engine control and the dynamic characteristics in drive lines. This paper focuses on the simulation of FTP-75 mode which is considered with spark timing control on transient condition. The acceleration is the most important factor for vehicle fuel economy. The retard of spark timing increases in proportion to acceleration. Likewise, bsfc(break specific fuel consumption) which is affected by spark timing also increases in proportion to acceleration. The result of simulation considered transient condition shows 0.3% of error comparing with a test on chassis-dynamometer.

Key words : Transient states(과도상태), Spark timing(점화시기), Break specific fuel consumption(제동 연료 소비율), Simulation(시뮬레이션)

Nomenclature

bmep : brake mean effect pressure
bsfc : brake specific fuel consumption
S/T : spark timing, degree
CA : crank angle
SR : speed ratio
TR : torque ratio

Subscripts

T : turbine
I : impeller

1. 서론

자동차에서 엔진의 상태를 최적으로 제어하기 위해 전자제어 시스템의 채용과 더불어 동력 전달 및 변속에 관한 특성연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 동력발생과 직접적으로 연관된 엔진 제어는 자동차에 대한 감성적 상품성, 즉 고품질감의 중요한 척도 및 출력, 효율, 배출물 특성에 중요한 영향을 미친다. 이를 연구하기 위해 엔진실험과 더불어 샤시 동력계를 통한 차량 실험을 하고, 컴퓨터의 발달로 인해 시뮬레이션을 통한 연구도 활발히 일어나고 있다. 샤시 동력계 연비모드중 하나인 FTP-75 모드 구간별 분석 결과 과도구간의 연료 소모량이 가장 큰 비중을 차지하고 있다.⁶⁾

*Corresponding author, E-mail: killjys@hotmail.com

차량 가속 운전 시 빠른 스로틀 개방으로 인하여 흡기압이 급격히 상승되고 이에 따른 급격한 부하의 증가 및 공연비의 변동¹⁾ 등으로 정상상태의 점화시기로 설정되어 있을 경우 바퀴의 슬립과 더불어 운전성과 상품성에 악영향을 끼치는 shock 및 jerk가 발생하게 된다. 이를 방지하기 위해 점화시기를 정상상태보다 지각되도록 제어한다. 이러한 점화시기 지각제어로 운전성을 향상시킬 수는 있으나 토크의 손실을 가져오게 하여 결국 연비에 좋지 않은 영향을 미친다.

따라서 과도구간에서의 차량 연비 특성을 비교 분석하기 위해서는 앞서 연구된 차량 연비 분석 시스템을 통해 취득되고 분석된 데이터를 바탕으로 과도구간 특성을 분석하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 엔진 실험과 사시 동력계 실험을 병행한 후 정상상태의 엔진실험 데이터를 기준으로 차량 실험 데이터를 비교 분석하여 가속구간의 점화시기 제어로직을 얻어내고, 이에 따른 bsfc 특성을 파악한 후 엔진, 동력전달계, 보기류 등 모든 차량 요소가 고려된 시뮬레이션 모델링에 과도구간 모델링을 추가하여 시뮬레이션이 실차거동과 유사하도록 하였다.

2. 엔진 및 FTP-75모드 특성 실험 및 분석

과도구간 특성 분석을 위해 사시 동력계 실험을 수행하였고, 정상상태의 점화시기 및 bsfc를 얻기 위해 엔진실험을 실시 한 후 과도구간에서 실차상태와 엔진실험 상태를 비교하였다.

2.1 실험 장치 및 실험 방법

엔진 및 차량 실험을 수행한 차량의 형식은 1800cc급 DOHC, VVTi, 가솔린엔진과 4단 자동 변속기가 장착된 차량이다. 엔진 및 차량의 실험 및 분석은 선행 연구원들이 정립한 방법론³⁻⁵⁾을 토대로 수행하였다.

2.2 실험결과 및 분석

2.2.1 엔진 및 FTP-75 모드 실험 결과

Fig. 1과 Fig. 2는 엔진 실험을 통해 결과이다. Fig. 1은 엔진 회전속도, bmep에 따른 bsfc를 나타낸 것이고, Fig. 2는 엔진 회전 속도, 흡기압에 따른 점화시기를 나타낸 것이다.

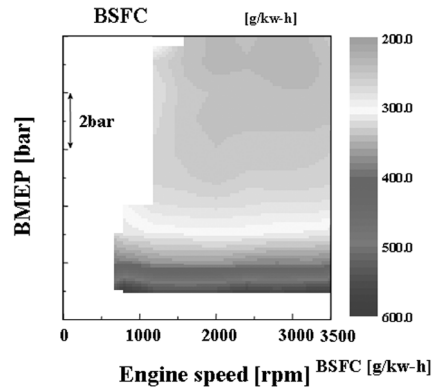


Fig. 1 Behavior of bsfc the engine test

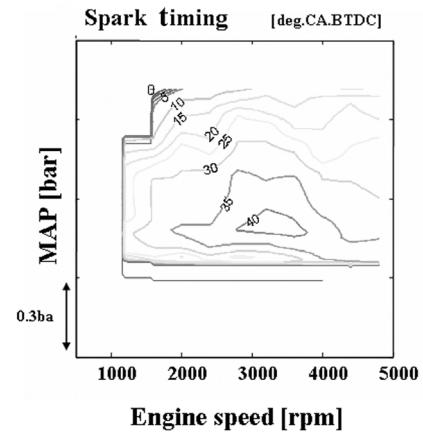


Fig. 2 Behavior of spark timing the engine test

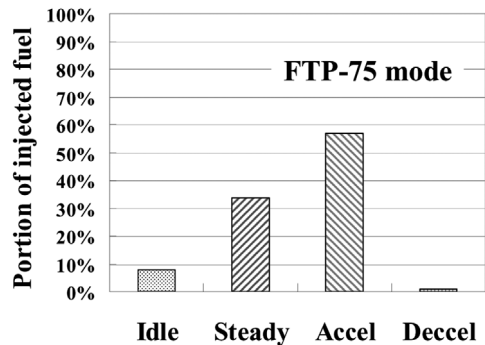


Fig. 3 Comparison of portion of injected fuel at driving sections

선행 연구원들이 정립한 방법론을 토대로 FTP-75모드를 분석한 결과가 Fig. 3이다. 감속구간은 총 투입된 연료량의 2%를 점유하고, 연료 분사량이 정상상태와 크게 차이가 나지 않으므로 과도상태의

대표구간을 가속 구간으로만 설정하였다.

2.2.2 엔진과 FTP-75모드 비교

엔진 실험과 모드 주행으로 얻은 데이터를 비교하기 위해 모드 주행에서 얻은 엔진속도와 bmep를 기준으로 엔진 실험 데이터를 내삽하여 엔진 실험 bsfc를 구하였고, 동일한 방법으로 모드주행 엔진속도와 흡기압을 기준으로 엔진 실험 데이터를 내삽하여 점화시기를 구하였다. 이렇게 얻어진 데이터의 신뢰성을 확인하기 위해 정상 상태인 정속구간에서 엔진 실험 데이터와 모드 주행 데이터를 비교해 보았다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 내삽으로 얻어진 엔진 bsfc, 점화시기가 모드주행 bsfc, 점화시기와 일치하는 것으로 나타났다.

정속구간에서 엔진 데이터와 차량 데이터를 비교하여 데이터 신뢰성을 검증 후 가속 구간을 비교하여 과도구간 특성을 확인해 보았다. 차량이 가속을 수행할 때 필요조건으로 엔진의 부하 및 회전속도를 증가시켜야 한다. 가솔린 엔진의 경우는 공기 유량을 통해 이를 해결하는데 Fig. 5에서 보는 것과 같이 차량 가속 시 공연비 희박화에 의한 실화방지를 위한 가속증량과 급격한 토크상승으로 인한 운전성 악화 및 shock & jerk방지를 위해 점화시기가 지각되도록 제어하며 이로 인해 bsfc가 악화되는 것을 볼 수 있다.

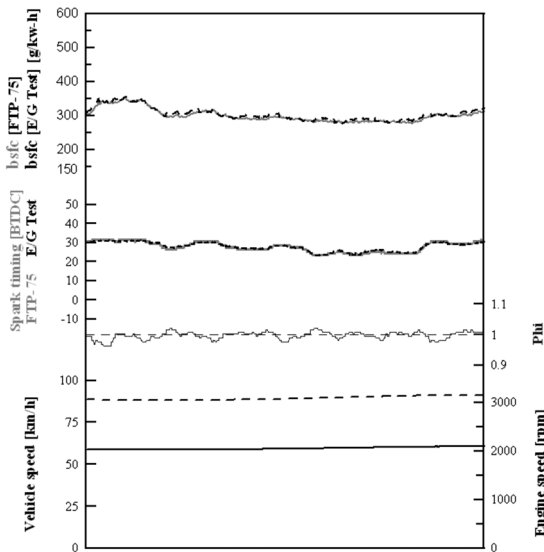


Fig. 4 Comparison of bsfc and S/T during steady

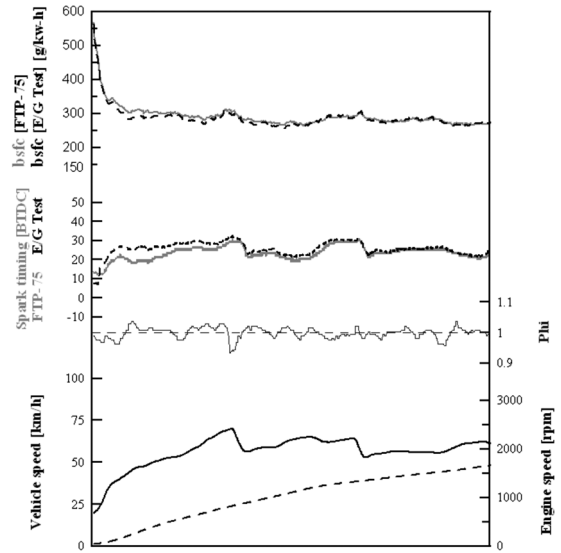


Fig. 5 Comparison of bsfc and S/T during acceleration

3. 시뮬레이션을 위한 모델링

Cruise를 이용한 시뮬레이션은 각 단품별로 물리적 특성과 기계적인 성능 및 효율과 관련된 정보들을 모두 필요로 한다. 이번 엔진 및 차량 모드 연비 실험을 분석한 결과를 통하여 차량의 단품에 대한 성능자료를 취득하여 시뮬레이션 입력 데이터로 활용하였다.

3.1 점화시기 지각제어 모델링

과도구간 점화시기 지각제어 인자로 스로틀 변화율, 엔진 가속도, 차량 가속도가 있는데 이번 실험 차량은 Fig. 6에서와 같이 차량 가속도에 따라 점화시기 지각제어가 경향을 보였다. 횡축의 Time은 FTP-75모드 시간을 나타낸 것이다. 차량 가속도 변화에 따라 최대 8도 지각제어를 하였으며, 차량 가속도 변화율에 따라 다른 경향을 보임으로, 가속도 변화율이 0보다 큰 구간과 작은 구간으로 나누어 모델링 하였다. Fig. 7, Fig. 8은 가속도에 따른 점화시기를 나타낸 것이다.

$$\Delta(S/T) = (S/T)_{Steady} - (S/T)_{Transient} \quad (1)$$

where S/T : spark timing (degree)

Fig. 9는 점화시기 지각에 따른 제동토크 감소 관계²⁾를 그린 것이다. Fig. 10과 Fig. 11은 점화시기 지

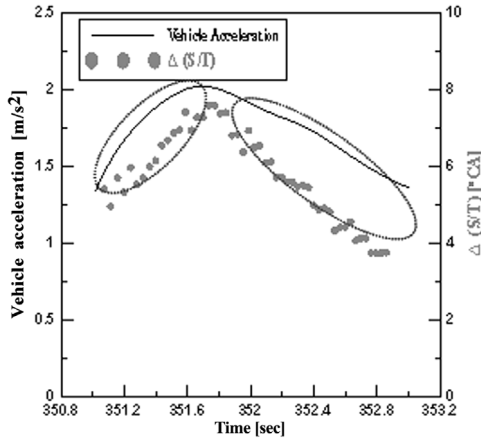


Fig. 6 Relative to spark timing and vehicle acceleration

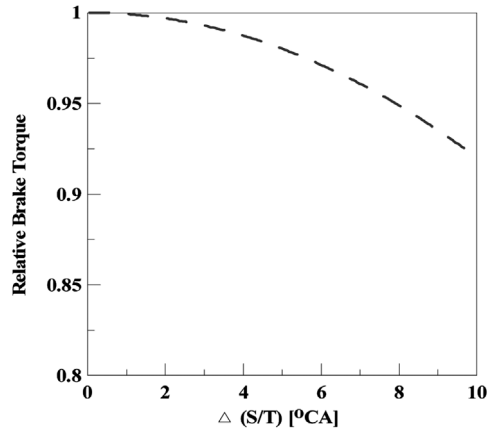


Fig. 9 Relative to spark timing and brake torque

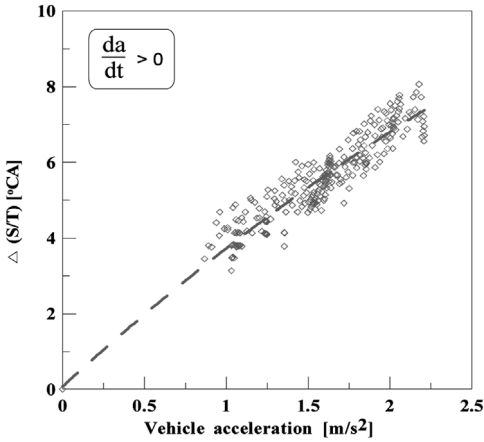


Fig. 7 Relative to spark timing and vehicle acceleration at rate of acceleration is plus

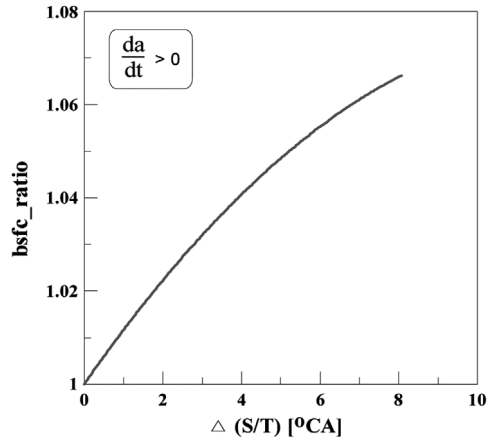


Fig. 10 Relative to spark timing and bsfc ratio at rate of acceleration is plus

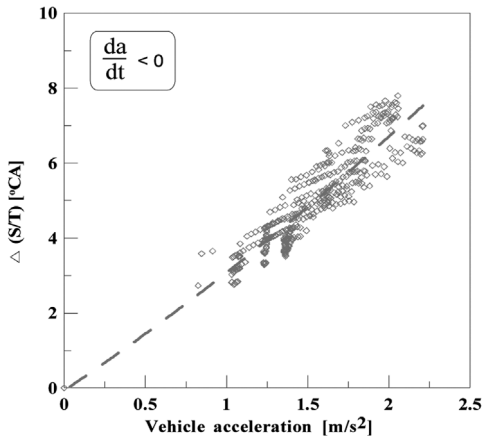


Fig. 8 Relative to spark timing and vehicle acceleration at rate of acceleration is minus

각에 따른 제동토크 감소 관계를 사용하여 점화각에 따른 bsfc ratio를 구한 것이다. 실차에서 얻은 bsfc를 제동토크 감소 관계식을 통해 얻은 bsfc로 나눠 구하였다. 이는 제동토크 감소 관계식이 차량마다 특성이 다르므로 이번 연구에서 적용한 제동토크 감소 관계식의 타당성을 검증하기 위함이다. 데이터 타당성을 검증하기 위해 실측하여 얻은 bsfc ratio와 제동토크 감소 관계식을 이용하여 만든 bsfc ratio를 비교한 것이 Fig. 12와 Fig. 13이다. 실선은 제동토크 감소 관계식을 이용하여 만든 것이고 점선이 실측하여 얻은 데이터이다.

$$bsfcratio = \frac{(bsfc)_{transient}}{(bsfc)_{steady}} \quad (2)$$

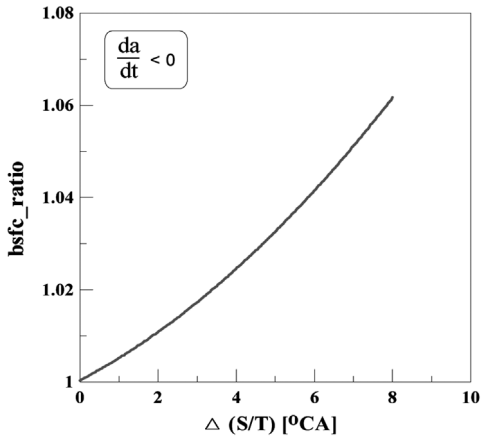


Fig. 11 Relative to spark timing and bsfc ratio at rate of acceleration is minus

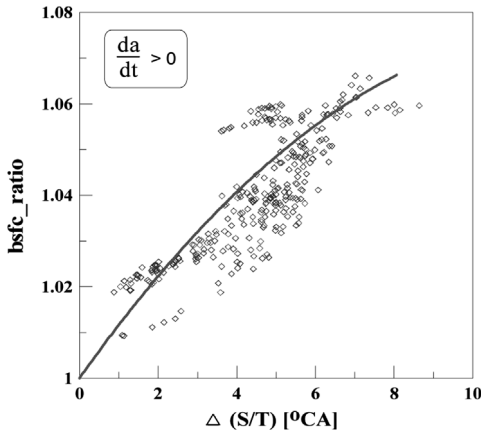


Fig. 12 Comparison of experiment bsfc ratio and simulation bsfc ratio at rate acceleration is plus

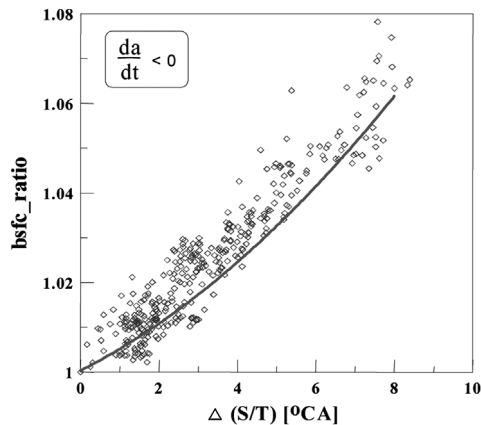


Fig. 13 Comparison of experiment bsfc ratio and simulation bsfc ratio at rate acceleration is minus

3.2 엔진 및 구동계 모델링

모델링은 동력 전달 과정을 고려해 엔진 및 구동계로 구분하였다. 먼저 엔진을 모델링하는 방법으로 엔진의 제동 연료 소비율, 전 부하 성능, 무부하 성능 등 특성 맵과 특성곡선을 사용하였고, 구동계 부분의 모델링은 차량 실험의 결과를 바탕으로 하였다. 먼저 토크 컨버터의 성능 실험을 통하여 Fig. 14와 같은 특성 곡선을 도출하였고, 각 기어 단에 따른 마찰 토크를 차량 속도에 따라 실험을 수행하여 함수식을 도출하여 구동계 마찰 토크를 구하였다.

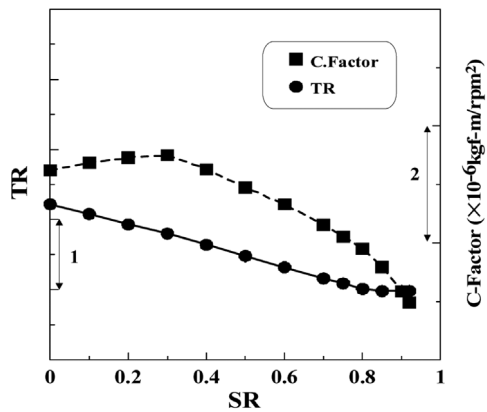


Fig. 14 TR and C-factor of the T/C according to SR

4. 차량 연비 시뮬레이션

정상상태 bsfc map을 사용하여 시뮬레이션 할 경우 생기는 오차를 최소화하기 위해 과도구간에서 점화시기 지각제어에 따른 bsfc악화를 실험을 통해 분석하였고, 이를 토대로 만든 transient model을 시뮬레이션에 적용하였다.

4.1 시뮬레이션 모델

자동차 시뮬레이션 전용 소프트웨어인 Cruise를 이용하여 실험차량을 모델링 하였다. Fig. 15는 연비 분석 모델에 대한 개략도이다. Cruise상의 기본 모델에 엔진의 전 부하성능, 무 부하성능, 보기류 모델, 엔진 온도의 워업 특성⁷⁾ 등에 본 연구에서 연구한 과도구간 모델링을 적용한 것이다. 차량 가속도 변화율이 0보다 큰 구간과 작은 구간으로 나뉘고, 차량 가속도에 따른 점화시기 지각제어 모델과 점화

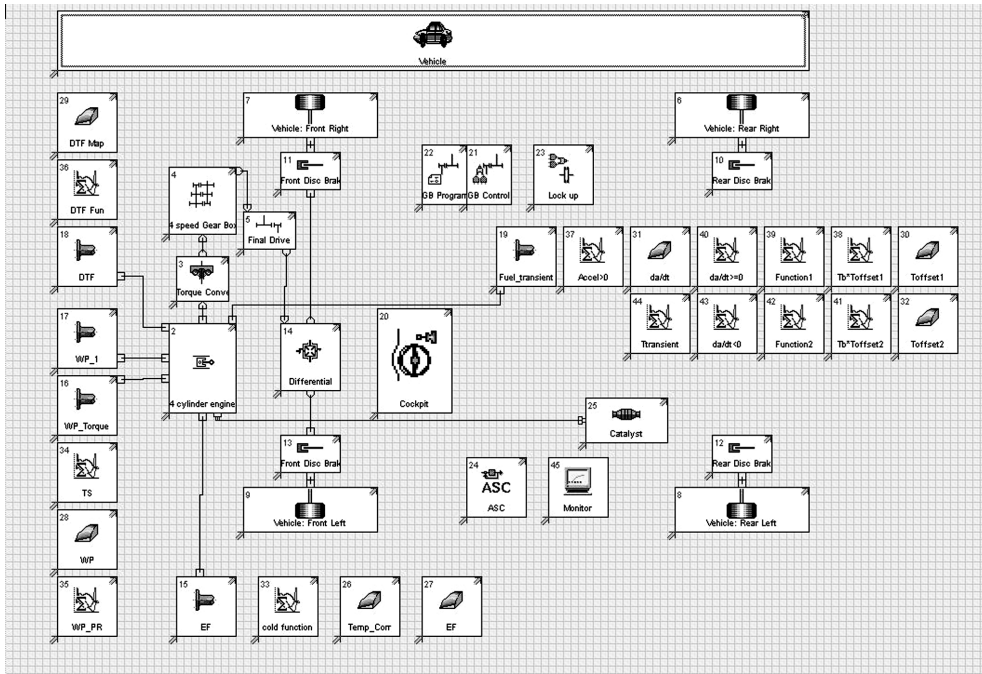


Fig. 15 Schematic diagram of basic vehicle modeling

시기 지각제어에 따른 토크손실 그래프를 사용하여 가속구간에서 점화시기 지각제어에 따른 토크손실을 제동토크에 더해 연료량을 보정하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

Fig. 16은 기본 Cruise모델에 보기류, 냉시동 모델

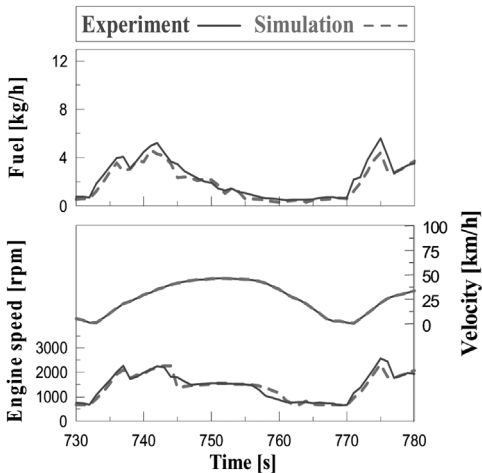


Fig. 16 Comparison of experiment and simulation do not consider spark timing retard modeling

만 적용하여 시뮬레이션 한 결과이다. 실선이 실차 시험 데이터이고 점선이 시뮬레이션 결과이다. 점화시기 지각제어에 따른 토크손실을 보상하지 않아 실차 대비 연비 오차가 3.5% 발생하였다.

이 연비 오차를 줄이기 위해 이번 연구 내용인 과도구간 제어 특성을 고려하여 시뮬레이션 한 결과

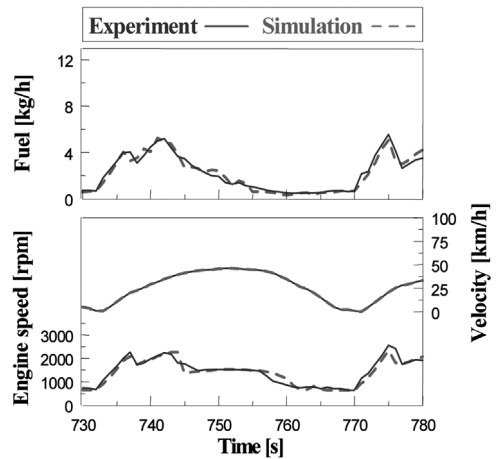


Fig. 17 Comparison of experiment and simulation consider spark timing retard modeling

가 Fig. 4.3이다. 과도구간에서 점화시기 지각제어에 따른 토크손실 보상으로 연료소모량이 실차에 근접하게 나오게 되어 실차 대비 연비 오차가 0.3% 이내로 근접하게 되었다. 이를 통하여 시뮬레이션을 통해 정확한 연비 예측이 가능하게 되었다.

5. 결론

본 연구에서는 엔진과 FTP-75모드 실험을 통해 과도구간 점화시기 지각제어에 따른 bsfc 영향을 분석하였고, 이를 시뮬레이션을 통해 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정속구간에서 정상 상태의 엔진 실험과 FTP-75 모드를 비교해 본 결과 점화시기와 bsfc가 거의 일치하였고, 가속구간에서는 타이어 슬립 방지 및 운전성 문제로 인한 점화시기 지각제어에 따른 bsfc악화현상을 보였다.
- 2) 과도구간에서 점화 시기는 차량 가속도에 비례하면서 지각되고, 이에 따른 토크손실로 인해 bsfc도 변하는 것을 알 수 있다. 이를 이용하여 과도구간에서 가속도에 따른 점화시기 제어와 bsfc를 모사할 수 있다.
- 3) Cruise를 이용해 transient model이 고려된 FTP-75 모드를 시뮬레이션 해본 결과 샤시 동력계에서의 연비 시험 결과와 0.3%의 오차를 보였다. 이는 정상상태 bsfc를 이용한 시뮬레이션 결과 (3.5%오차)보다 훨씬 정확한 결과를 얻었다. 이로써 시뮬레이션을 통해 보다 정확한 연비 예측이 가능해졌다.

후 기

본 연구는 산업자원부 주관 자동차기반기술사업의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) J. H. Lee, "Measurement and Analysis of Knock for Rapid Throttle Opening on SI Engine," Transactions of KSAE, Vol.9, No.7, pp.28-35, 1999.
- 2) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill, pp.372-375, 1988.
- 3) H. B. Song, Modeling and Experiments for the Breakdown of Fuel Consumption in a Passenger Car, Ph. D. Dissertation, Ajou University, pp.61-79, 2002.
- 4) Feng An and Frank Stodolsky, "Modeling the Effect of Engine Assembly Mass on Engine Friction and Vehicle Fuel Economy," SAE 950988, 1995.
- 5) D. K. Kim, A Study of Combustion Characteristics of Dual Spark Plug Engine and Fuel Economy Simulation, M. S. Thesis, Ajou University, pp.4-6, 2007.
- 6) S. I. Lee, Analysis of the Factors Affecting Vehicle Fuel Economy During Acceleration, M. S. Thesis, Ajou University, pp.23-28, 2003.
- 7) B. S. Kim, Effect of Engine Friction on Vehicle Fuel Economy during Engine Warm-up Considering Oil Temperature, M. S. Thesis, Ajou University, pp.14-16, 2006.