

자동변속기 차량의 직결영역 변화에 따른 연비 특성에 관한 연구

김우석¹⁾ · 한창호²⁾ · 김남균²⁾ · 박경석³⁾ · 박진일⁴⁾ · 이종화^{*4)}

현대기아기술연구본부¹⁾ · 아주대학교 기계공학과²⁾ · 금오공대 기계공학부³⁾ · 아주대학교 기계공학부⁴⁾

Effect of Lock-up Control Strategy on Vehicle Fuel Economy

Wooseok Kim¹⁾ · Changho Han²⁾ · Namkyun Kim²⁾ · Kyungseok Park³⁾ · Jinil Park⁴⁾ · Jonghwa Lee^{*4)}

¹⁾Hyundai Motor Co., 77-1 Jangduck-dong, Whaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

²⁾Automotive Engineering Lab, Ajou University, Gyeonggi 442-749, Korea

³⁾School of Mechanical Engineering, Kumho University, Gyeongbuk 730-701, Korea

⁴⁾School of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 442-749, Korea

(Received 23 March 2005 / Accepted 9 November 2005)

Abstract : Experiments are conducted to compare fuel economy of FTP-75 mode on two different lock-up conditions; (A) Lock-up on at engine speed of 1,200(rpm) and above for 3rd & 4th gear, (B) Lock-up on at engine speed of 1400rpm and above for 4th gear only. As a result, case A had better fuel economy about 2.75(%) than case B for FTP-75 mode. Simulation(CRUISE, AVL) study is also carried out in order to estimate the effect of Lock-up control strategy for vehicle fuel economy. The fuel economy simulation result agrees with the measured fuel economy within error of 2(%). The improved Lock-up control strategy is proposed by simulation.

Key words : Fuel economy, Break-down of vehicle fuel consumption, Fuel economy during acceleration, BSFC

Nomenclature

T : torque(Nm)
I : inertial mass moment
 α : angular acceleration

Subscripts

TF : total friction
i : indicated
b : brake
EF : engine friction
pump : pumping
DCL : damper clutch loss
DT : drive train

1. 서론

최근 자동차 배기가스 규제가 강화되고 환경오염에 대한 관심이 고조되면서 엔진의 고효율화 기술에 대한 요구가 확대되고 있다. 이에 따라 자동차에서 엔진의 상태를 최적으로 제어하기 위한 전자 제어 시스템의 채용뿐만 아니라 동력 전달 및 변속에 관한 특성연구가 보편화 되고 있다.¹⁾

특히 자동변속기에 있어서 전체적인 성능 개선을 달성하려면 구동성능향상을 위해 최적의 변속시점 및 직결시점 결정, 클러치 압력제어와 엔진/변속기의 종합적인 제어가 요구된다.²⁾ 또한 엔진과 변속기의 제어 시스템을 채용하기 위해서는 시스템에 영향을 주는 많은 변수들에 대한 제어알고리즘의 실험적 검증 및 확인 과정을 거쳐야 한다.

자동변속기는 이전의 수동변속기에 비해 변속시

*Corresponding author. E-mail: jlee@ajou.ac.kr

점을 적절하게 제어함에도 불구하고 수동변속기 보다 연비가 안 좋은 것으로 평가 받는다. 이는 토크컨버터에서의 동력전달 과정 중 에너지 손실에 의한 영향으로 볼 수 있다. 이러한 손실을 줄이기 위해서는 고속에서의 적절한 직결영역 설정이 필요하다. 그런데 직결영역 설정에 따라 차량의 연비 차이가 존재하므로 차량의 운전성을 해치지 않는 범위에서 가장 좋은 연비를 갖는 최적의 직결영역을 설정하는 것이 중요하다.^{3,4)}

그러므로 직결영역에서 엔진의 연소현상 및 엔진 제어에 대한 자세한 연구가 필요하며 연비에 영향을 미치는 인자들에 대한 현상 분석이 선행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 록업영역 변화에 의한 차량의 연비특성을 측정하기 위해서 데이터 수집 시스템을 제작하였으며 분석기술에 대한 내용을 설명하였다. 차량동력부는 크게 엔진부와 동력 전달부로 나누어 엔진의 마찰, 엔진의 회전관성, 동력전달부의 마찰과 동력전달부의 회전관성을 측정하여 이를 토대로 주행 중에 측정할 실린더 내 압력을 이용해 계산한 토크가 차량의 각 부분으로 소산되는 토크들을 계산하여 직결영역 변화에 따른 연비 기여도를 비교 분석하였다. 그리고 실 차량 데이터를 이용한 시뮬레이션을 수행하여 차량의 연비를 저감 시키는 방법을 모색하였다.

2. 차량 동력계 모델

Fig. 1은 차량동력계의 모델을 나타낸 것이다. 차량동력계는 크게 엔진부와 동력 전달부로 나눌 수 있다. 동력 전달부는 변속기, 동력 전달계, 차륜을 포함시켰다.^{5,7)}

엔진에서 발생된 토크는 엔진마찰이나 엔진의 회전수를 증가시키는데 사용되고 나머지 부분이 동력 전달부로 전달되어 차륜을 구동시킨다.

엔진의 동력 발생 과정을 단순화 시키면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_i - T_{TF} - I_E \alpha_E = T_l \quad (1)$$

식 (1)에서 T_i 는 엔진에서 연소에 의해 발생된 토크, T_{TF} 는 엔진 마찰, 펌핑 그리고 보기류 구동에

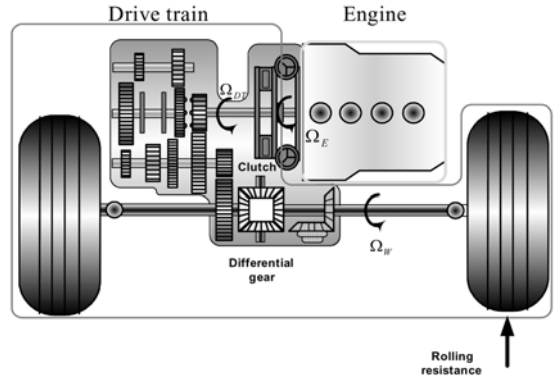


Fig. 1 Schematic diagram of power train

의해 소산된 토크의 합, I_E 는 엔진의 회전 관성모멘트, α_E 는 엔진의 각 가속도이고 T_l 는 변속기의 입력토크, 즉 엔진의 제동 토크를 의미한다.

엔진에서 발생된 토크를 측정하기 위해서는 직접 축토크 센서를 통해 측정하는 방법이 정확하지만 실 차량에서 센서를 설치하기에는 어려움이 많다. 본 연구에서는 엔진의 크랭크각 1도마다 실린더 압력을 직접 측정하여 계산한 전체도시평균 유효압력 (IMEPgross)으로부터 엔진의 토크를 측정한다. 여기서 얻어진 엔진의 토크는 다음의 식 (2)와 같이 제동토크(T_b), 엔진의 기계적 마찰(TEF), 보기류 손실(T_{alt})과 펌핑손실(T_{pump})의 합으로 나타낼 수 있다.

$$T_i = T_b + T_{EF} + T_{alt} + T_{pump} \quad (2)$$

식 (2)에서 가솔린 기관에서 엔진의 부하에 따라 기계적 마찰토크가 증가하나 펌핑 토크가 감소하기 때문에 총 마찰토크는 엔진 회전수의 함수로 나타낼 수 있다.^{1,8)}

Fig. 2는 엔진 회전수에 따라 엔진 총 마찰 토크를 측정한 값을 나타낸다. 각 데이터 포인트는 150사이클의 평균값이다. 엔진회전수가 증가함에 따라 엔진의 총 마찰토크도 증가하는 것을 보여준다. 본 연구에서는 총 엔진 마찰을 2차식으로 표현하여 사용하였다.

엔진의 제동토크가 차륜까지 전달되는 과정을 단순화 시키면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_l - T_{DCL} - T_{CL} - T_{DTF} - I_{DT} \alpha_{DT} = T_W \quad (3)$$

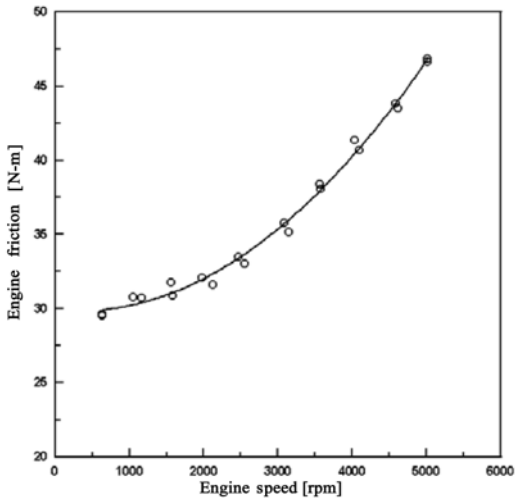


Fig. 2 Engine friction as a function of engine speed

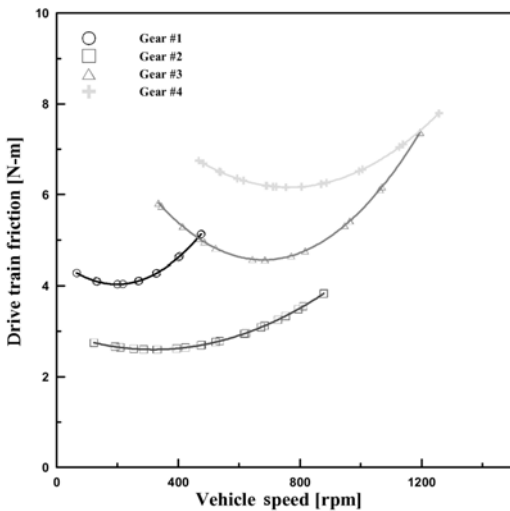


Fig. 3 Drive train friction as a function of engine speed at each gear stage

식 (3)에서 T_I 는 토크 컨버터의 임펠러토크, T_{DCL} 은 댐퍼 클러치 동작에 의한 손실, T_{CL} 는 변속 시 클러치 손실, T_{DTF} 는 구동계의 마찰손실, T_{DTI} 는 구동계의 회전 관성 손실을 의미한다.

자동변속기 차량의 터빈축 토크는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_T = TR \cdot T_I = TR \cdot T_b \quad (4)$$

Fig. 3은 바퀴의 각속도에 따른 동력전달부의 마

찰토크를 실험한 결과이다. 각 기어 단계에서의 마찰토크를 살펴보면 엔진의 마찰토크에 비해 상대적으로 작은 값을 가진다.

3. 실험장치 및 실험방법

먼저 엔진 마찰토크, 엔진 회전관성, 동력 전달부의 마찰토크, 동력 전달부의 회전관성을 측정하였다. 엔진 마찰토크는 기어를 무부하 상태인 중립으로 놓고 실린더 압력을 측정함으로써 구할 수 있다. 엔진 회전 관성은 무부하 상태에서 엔진 회전수를 변화시키면서 측정하였다.

또한 차량의 전륜을 지면에서 떨어지게 하여 차륜의 부하를 제거한 상태에서 동력 전달부의 마찰토크와 회전관성을 각 기어 단수별로 측정하였다.

시험차량은 2.4L DOHC 엔진과 4속 자동변속기가 장착된 전륜 구동 차량이다. Table 1은 엔진의 제원과 엔진 관성을 나타낸 것이고 Table 2는 자동변속기의 기어단에 따른 동력 전달부의 관성을 나타낸 것이다.

Table 1 Engine specifications

구분		시험차량
Engine	배기량(cc)	2,360
	압축비	10.5
	Engine inertia(kg · m ²)	0.251

Table 2 Drivetrain inertia of auto transmission

구분		시험차량	
T/M	형식	A/T	
	Drivetrain inertia (kg · m ²)	1st gear	3.74
		2nd gear	2.95
		3rd gear	3.17
		4th gear	3.22

Fig. 4는 실험장치의 개략도를 나타낸 그림이다. 엔진에서 발생된 토크를 계산하기 위하여 엔진 회전에 따른 압력을 측정하여 imepgross를 구한다. 엔진의 회전수를 측정하기 위하여 1회전당 360펄스가 발생하는 엔코더를 엔진의 크랭크축에 장착하였으며 1도당 압력을 측정하기 위해 점화플러그 장착형 압력센서를 설치하였다.

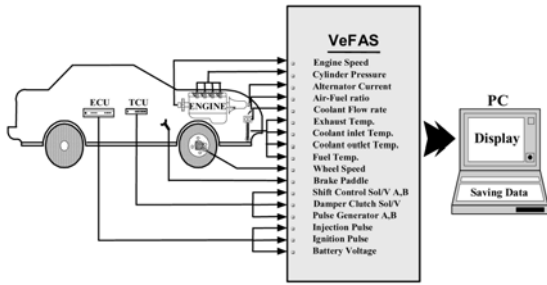


Fig. 4 Schematic diagram of data measurements

냉각수, 연료, 흡기 매니폴더, 엔진오일, 기어오일과 외기온도를 측정하기 위하여 T-type 열전대를 설치하였고 배기가스 온도를 측정하기 위하여 K-type 열전대를 설치하였다. 공연비 측정을 위하여 광역산소센서(UEGO, HORIBA) 센서를 배기 매니폴더로부터 50mm 떨어진 곳에 설치하였고 차량의 속도를 측정하기 위하여 차량 바퀴축에 엔코더를 장착하였다. 엔진 컨트롤러의 연료분사 시간을 측정하는 뒤 인젝터의 연료분사식에 대입하여 연료소모량을 계산하였다. 기타 신호들은 엔진 컨트롤러와 변속기 컨트롤러로 입출력 되는 신호로부터 취득, 교정하였다.

자동변속기 장착차량의 직결구간의 변화에 따른 연비 특성을 파악하기 위하여 동일한 차량에서 4단 기어 1400rpm 이상일 때 직결되는 경우와 3단과 4단 기어 1200rpm 이상일 때 토크컨버터의 임펠러와 터빈이 직결되는 두 가지 경우로 나누어서 실험하였다. 주행패턴을 동일하게 하기 위해 로스엔젤레스 시가지의 주행흐름을 모사한 LA-4 주행 모드를 사용하는 FTP-75 모드에서 연비를 비교하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 연비기여도 분석

4단기어 1400rpm 이상일 때 직결되는 경우와 3단과 4단 기어 1200rpm 이상일 때 토크컨버터의 임펠러와 터빈이 직결되는 두 가지 경우로 나누어서 실험한 결과 Table 3과 같은 CVS 결과가 나왔다.

Table 3 Comparison of fuel economy at FTP-75 mode

Mode	CVS(km/l)	연비비교(%)
4단,1400rpm 직결	10.6	-
직결영역 확대	10.9	2.75% 우세

Table 3에서 직결영역을 3단과 4단의 1200rpm 이상으로 확대 했을 때가 CVS 분석결과 약 2.75%가 연비 이득을 보는 것으로 나왔다. 특히 고속도로를 자주 이용하는 차량의 경우 직결영역 설정은 연비에 중대한 영향을 미치게 될 것이라 생각한다.

Fig. 5는 제동구간을 제외한 직결영역 변화에 따른 연비기여도를 나타내었다. 3, 4단 1200rpm 이상일 때 직결하는 경우 가속과 변속 상태에서의 A/F 제어 특성에 의하여 불완전 연소 손실은 2.4% 우세하게 나타났다. 직결영역 변화에 따라 비 직결시 토크컨버터에서의 동력 손실로 3, 4단 직결하는 경우가 토크컨버터 손실이 2.0% 만큼 우세하다. 그리고 직결영역이 확대된 경우 직결에 의한 엔진 마찰 손실이 0.31% 우세하게 나타났으나 엔진 열손실이 2.55% 열세로 나타났다. 따라서 연비 측면에서 토크컨버터에 의한 연비 이득이 0.22(kpl), 불완전 연소에 의한 연비 이득이 0.17(kpl), 엔진 제동효율에 의한 연비 손실이 0.19(kpl)로 나타나 전체적으로 0.30(kpl)의 연비 이득을 얻고 있다.

Fig. 6과 7은 FTP-75모드의 마지막 가속구간을 차량정보를 살펴본 것이다. Fig. 6에서 기어가 3,4단이고 엔진 회전 속도가 1200rpm 이상일 때 직결영역이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 엔진 회전속도가 변동될 때를 제외한 대부분의 구간이 직결된 상태로 차량이 운행하여 연료소비가 적음을 알 수 있다.

그리고 3단으로 변속된 후 엔진 회전수가 1200rpm 보다 커지는 시점에서 토크컨버터의 임펠러와 터빈

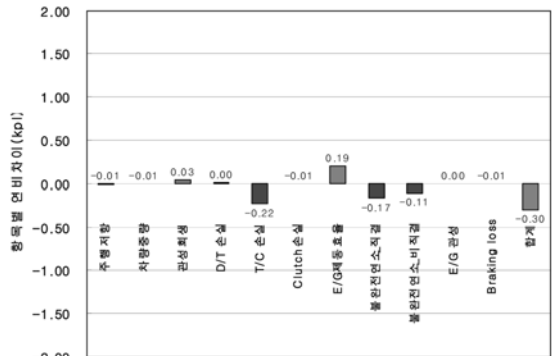


Fig. 5 Comparison of fuel consumption according to changing the lock-up area

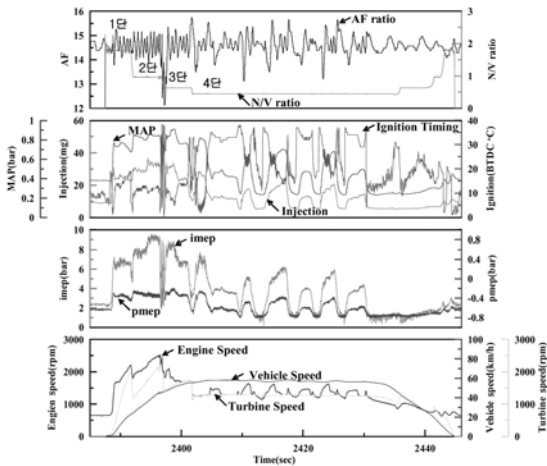


Fig. 6 Measured engine data during lock-up at 3rd & 4th gear stage

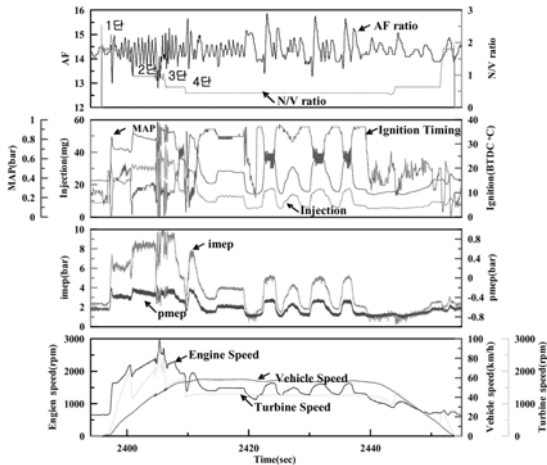


Fig. 7 Measured engine data during lock-up at 4th gear stage

이 직결되었다. 엔진의 회전 속도가 변하는 구간을 제외하고는 토크 컨버터가 직결된 상태로 운전되었다. 4단 직결영역 정속 상태를 살펴보면 분사되는 연료량의 차이를 확인할 수 있다.

Fig. 7에서는 4단에서조차 직결영역이 형성되지 않아 엔진 회전 속도가 터빈의 회전속도보다 높게 형성되어 직결된 상태보다 총 사이클 수의 증가로 연비가 나빠지게 된다. 그리고 토크컨버터의 슬립으로 인한 토크 손실 때문에 분사되는 연료량이 증가되어 있는 것도 확인할 수 있었다. 상대적으로 토크 컨버터에서의 손실보다는 엔진 회전속도 증가로 인한 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 또한 A/F ratio

의 비교를 통하여 직결영역이 확대된 차량에서 상대적으로 적은 연료가 사용되고 있음을 예측할 수 도 있다.

같은 변속비에서 같은 속도를 유지하기 위해서는 차량의 구동토크는 토크 컨버터의 터빈 토크와 비례하여 나타난다. 고속 영역에서 자동변속기에서의 직결 영역이 설정되지 않는다면 같은 구동 토크를 내기 위해 엔진은 토크 컨버터의 슬립 손실을 감안하여 더 많이 회전되어야 한다.

Fig. 8을 살펴보면 직결영역이 거의 없는 Fig. 9에 비해 isfc와 bsfc곡선이 낮게 형성됨을 알 수 있다. Fig. 8의 4단 영역에서 두 번째로 직결되는 부분(2408초)을 살펴보면 분사된 연료량보다 엔진에서 발생된 imep의 비교를 통해 비직결 상태에서 더 많은 연료가 분사되었음을 알 수 있다. 그리고 차량의 감속 시 토크 컨버터의 임펠러와 터빈을 직결시켜 차량의 관성에너지 회생하여 이용하는 감속직결 제어를 함으로써 불필요한 연료 소모를 줄이고 엔진의 속도를 유지하는데 사용되고 있다. 그러나 감속 직결 상태에서 연료차단 제어를 하지 않아 완전한 연비 효과를 보지 못하고 있다. 차량의 동력성을 해치지 않는 범위에서 감속직결 시 연료차단 제어를 함으로써 연비효과를 기대할 수 있을 것이다.

특이한 것은 2단에서 3단 변속 시 심한 차량 충격이 생긴다는 것이다. 이는 Fig. 7에서 차량의 점화시기 제어와 연료량 제어를 제대로 하지 못하여 심한

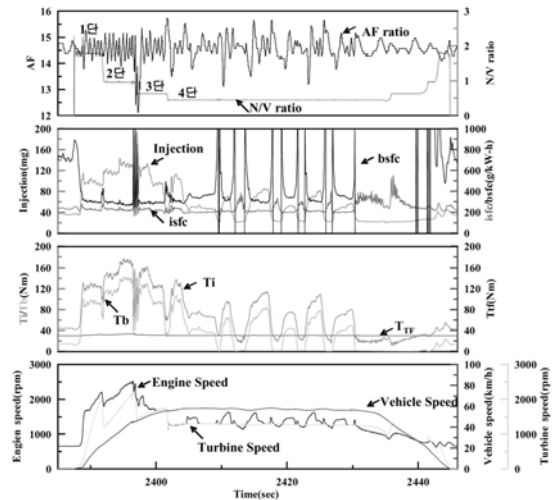


Fig. 8 Engine isfc & bsfc during lock-up at 3rd & 4th gear stage

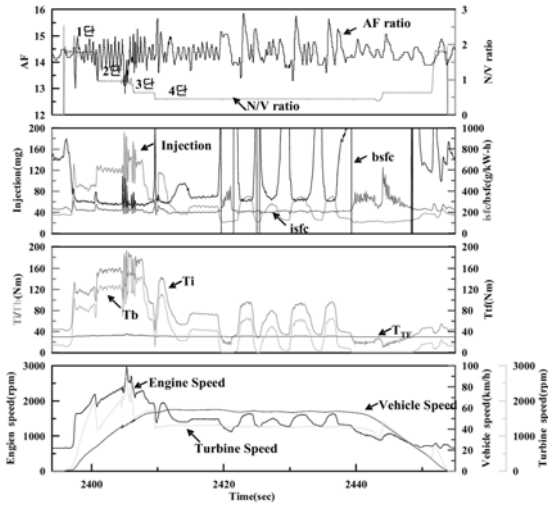


Fig. 9 Engine isfc & bsfc during lock-up at 4th gear stage

충격을 준 것으로 보인다. 변속 시 충격을 완화시키기 위해서는 연료량을 서서히 감소시키는 동시에 점화시기를 지각시켜서 토크의 갑작스런 변화를 방지한 뒤 가속을 위해 연료를 서서히 증가시키고 점화시기를 부드럽게 진각시켜 토크를 부드럽게 높여주는 제어가 필요하다고 보여진다.⁹⁾

4.2 차량 시뮬레이션

차량을 실차와 근접하게 모델링하기 위하여 FTP-75 모드 주행을 통해 얻은 bsfc map, 변속패턴, 엔진마찰, 엔진 관성 등의 실 데이터들을 CRUISE (AVL)에 적용하였다. Table 5는 FTP-75 모드 주행 Simulation을 수행한 결과이다. 이는 Simulation이 실제 차량의 상태를 잘 모사하고 있음을 보여준다.

3, 4단 직결영역을 변화시키면서 FTP-75 모드를 시뮬레이션 한 결과 Fig. 10의 연비 특성을 얻었다.

Table 5 Comparison of Simulation results during lock-up control

	Case A	Simulation A	Case B	Simulation B
직결조건 (rpm)	4단 1400	1400	3, 4단 1200	1200
직결해제 (rpm)	1400	1400	1200	1200
모드연비 (km/l)	10.6	10.65	10.9	11.12
오차(%)	-	0.48	-	2.02

엔진 회전속도가 1200(rpm)에서 토크컨버터의 임펠러와 터빈이 직결하고 900(rpm) 이하에서 감속직결을 해제할 때 11.14(kpl)로 가장 좋은 연비 특성이 나타났다. 비직결 상태의 연비와 비교해 볼 때 6.9%의 연비 향상 효과를 가져왔다.

감속직결 조건을 800(rpm) 이하로 설정하였을 때 3단에서 2단으로 변속하는 구간이기 때문에 연비 향상 효과는 기대하기 어렵다. 그리고 감속직결 조건을 1000(rpm) 이상으로 설정하면 직결 감속 구간에서의 에너지 회생이 줄어들기 때문에 연비가 나빠진다. 직결 조건을 1200(rpm) 이상으로 설정하면 직결이 시작되는 영역이 감소하기 때문에 연비특성이 나빠진다. 그런데 토크컨버터가 1000(rpm)에서 1150(rpm) 사이에서 직결이 될 경우에는 변속 후 가속되는 과도구간이기 때문에 직결을 할 경우 오히려 연비특성이 0.09% 나빠지게 된다. 1200(rpm)에서 직결되고 900(rpm)까지 감속직결을 유지할 때 실험 차량에서 설정된 3,4단 1200(rpm)에서 직결되는 경우보다 0.26% 연비 향상 효과를 보았다.

Fig. 11은 1200(rpm)에서 직결되고 1100(rpm)까지 감속직결이 이루어질 때 감속구간에서의 직결해제 후 재 직결로 인한 변속 품질이 나빠지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 직결영역이 설정되는 부분과 해제되는 부분이 주행 중 엔진 회전수와 유사한 값을 가지게 되어 직결과 직결해제가 반복적으로 나타나기 때문이다. 이와 같이 변속품질에 영향을 미치는 영역은 직결 영역 설정 시 고려해야 할 부분이 라 사료된다.

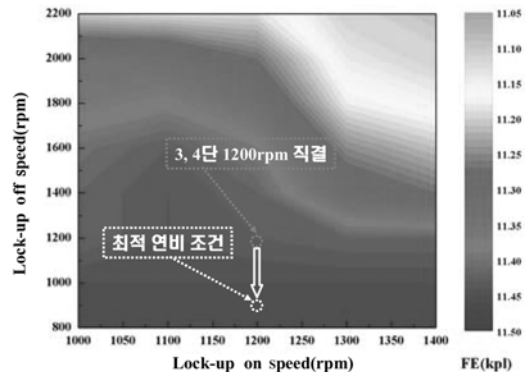


Fig. 10 Comparison of Fuel Economy according to changing lock-up area

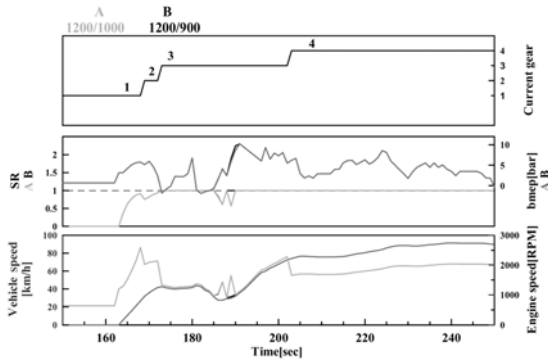


Fig. 11 Comparison of driving data according to changing Lock-up area

5. 결론

본 연구에서는 직결영역 변화가 차량 연비에 주는 영향을 비교분석하기 위하여 FTP-75모드를 주행하여 항목별 연비기여도를 분석하였고, 차량 주행 시뮬레이션을 통하여 연비 특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 3, 4단 엔진 회전수가 1200(rpm) 이상에서 직결되는 경우와 4단 1400(rpm) 이상에서 직결되는 경우로 구분하여 FTP-75 모드를 따라 주행한 결과, 직결영역을 확대한 경우가 약 2.75(%)의 연비 이득이 있었다. 차량의 데이터를 취득하여 분석한 결과, 비직결로 인한 토크컨버터에서의 손실이 2.0(%) 열세, 가속과 변속 상태에서의 A/F제어가 원인이 되어 불완전 연소에 의한 손실이 직결 시 1.66(%) 열세, 엔진 제동효율 측면에서 엔진 열손실 1.6(%) 우세한 순서로 전체 차량 연비 특성을 결정하는데 기여하였다. 이는 직결영역을 4단 1400(rpm) 이상으로 제한한 경우 토크컨버터에서의 임펠러와 터빈이 거의 직결되지 않았고 주행 시 비직결로 인한 엔진 회전 속도가 높게 형성되어 사이클 증가를 가져와 연료 소모가 높게 나타났다으며 높은 엔진 회전 속도에 의한 추가적인 엔진의 마찰손실에 기인하였다.
- 2) 차량의 실 주행 데이터를 바탕으로 2.4L 차량을 모델링 하여 FTP-75 모드 주행 시뮬레이션을 수행한 결과, 실험 결과와 2% 미만의 오차를 가졌다. 3, 4단에서 엔진 회전속도가 1200(rpm) 이상일 때 직결하고 900(rpm)까지 감속직결을 적용할 경

우 비직결 상태로 운전한 경우보다 6.9%의 연비가 개선되었다. 직결되는 영역을 1200(rpm) 이하로 설정할 때에는 변속 후 가속되는 과도구간이기 때문에 연비 특성이 0.09% 나빠졌다. 따라서 시뮬레이션을 통하여 연비 특성이 좋은 영역을 설정하는 것은 시간과 노력을 줄일 수 있는 효과적인 방법이라 판단된다.

후 기

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

References

- 1) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals McGraw Hill, New York, 1988.
- 2) K. I. Lee, H. S. Jeong, S. B. Jung and J. Y. Kang, "Trends of Electronic Controller in Power Transmission System," Journal of KSAE, Vol.15, No.2, pp.1-10, 1993.
- 3) T. Kugimiya, J. Mitsui, N. Yoshimura and H. Kaneko, "Development of Automatic Transmission Fluid for Slip-Controlled Lock-Up Clutch Systems," SAE 952348, 1995.
- 4) H. Sin, The Business with a Transmission Theory which is the Automatic and CVT, Goldenbell, Korea, 2000.
- 5) H. B. Song, Y.-J. Choi, J.-H. Lee, H.-S. Cho and N.-H. Cho, "An Experimental Study of the Improvement of Drivability in Vehicle Acceleration Mode," Transactions of KSAE, Vol.9, No.6, pp.65-75, 2001.
- 6) H. B. Song, Modeling and Experiments for the Breakdown of Fuel Consumption in a Passenger Car, Ph. D. Dissertation, Ajou University, 2002.
- 7) F. An and F. Stodolsky, "Modeling the Effect of Engine Assembly Mass on Engine Friction and Vehicle Fuel Economy," SAE 950988, 1995.
- 8) R. Harari, "Measurement of Engine Friction Power by using Inertia Tests," SAE 950028, 1995.
- 9) M. Lbamoto, "Development of Smooth Shift Control System with Output Torque Estimation," SAE 950900, 1995.