

가솔린 차량의 각 요소별 연료소모량 예측

송해박¹⁾ · 유정철^{*1)} · 이종화²⁾ · 박경석³⁾

아주대학교 기계공학과¹⁾ · 아주대학교 기계 및 산업공학부²⁾ · 금오공과대학교 기계공학과³⁾

Prediction of Vehicle Fuel Consumption on a Component Basis

Haibak Song¹⁾ · Jengcheol Yoo^{*1)} · Jonghwa Lee²⁾ · Kyungseok Park³⁾

^{1,2)}Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gu-mi 730-701, Korea

(Received 20 May 2002 / Accepted 7 February 2003)

Abstract : A simulation study was carried to analyze the vehicle fuel consumption on component basis. Experiments were also carried out to identify the simulation results, under FTP-75 Hot Phase driving conditions, and arbitrary driving conditions. A good quantitative agreement was obtained.

Based on the simulation, fuel energy was used in pumping loss(3.7%), electric power generation(0.7%), engine friction(12.7%), engine inertia(0.7%), torque converter loss(4.6%), drivetrain friction(0.6%), road-load(9.2%), and vehicle inertia(13.4%) under FTP-75 Hot Phase driving conditions.

Using simulation program, the effects of capacity factor and idle speed on fuel consumption were estimated. A increment of capacity factor of torque converter resulted in fuel consumption improvement under FTP-75 Hot Phase driving conditions. Effect of a decrement of idle speed on fuel consumption was negligible under the identical driving conditions.

Key words : Fuel consumption on component basis(각 부 연료소모량), Effect of capacity factor of torque converter on fuel consumption(용량계수의 영향), Effect of idle speed on fuel consumption(엔진 공회전 속도의 영향)

Nomenclature

- A : area, m²
- B : sonic velocity, m/s

Subscripts

- A,B,C,P: nodal point
- L,R : left, right

1. 서론

시뮬레이션은 차량을 설계하고 이를 평가하는 데

있어서 매우 중요한 도구가 된다. 실차 실험을 통하여 이러한 작업을 직접 수행하려면 많은 비용과 시간들이 투자되어야 한다. 따라서 정확도가 높은 차량 연비 예측 모델은 차량을 개발하는데 드는 비용과 노력들을 줄일 수 있다. 또한 차량 개발의 초기 단계에서부터 새로운 개념과 아이디어를 적용할 수도 있기 때문에 더욱 유용한 도구가 될 수 있다.

시뮬레이션을 통한 차량 연비에 대한 연구는 많이 이루어졌으며 비교적 정확하게 유추해내고 있으나 대부분 총 투입된 연료에 대한 평가만 이루어지고 있다.¹⁻⁴⁾ 그러나 차량의 연비 개선을 위해서는 총 투입된 연료량 뿐만 아니라 차량 각부에서 소모된

* To whom correspondence should be addressed.
L24027@orgio.net

연료량을 파악할 수 있어야 한다.

본 연구는 차량 구동계 각부에서 소모된 연료량을 예측할 수 있도록 모델링을 수행하였으며, 예측된 항목을 실차 실험을 통한 측정치와 비교, 검증하였다. 아울러 이를 바탕으로 토크 컨버터의 용량계수와 공회전 속도가 차량연비에 미치는 영향을 예측, 분석하였다.

2. 연료소모량 예측을 위한 시뮬레이션

2.1 동력 전달계 모델링^{5,6)}

엔진에서 발생된 토크는 토크 컨버터와 변속기를 거쳐 최종 감속기를 지나 차륜에 전달된다. 차륜에 전달된 토크는 주행저항에 따라 차량을 가속, 정속, 그리고 감속시키게 된다.

본 절에서 유도되는 운동방정식은 엔진계와 구동계로 나누어 질 수 있다. 엔진계는 엔진, 보조 장치, 그리고 토크 컨버터의 임펠러축을 포함하며 구동계는 토크 컨버터의 터빈축, 변속기, 그리고 최종 감속기와 차륜을 포함한다.

연소에 의해 생성된 토크(T_i)는 가스 펌핑에 소모되는 토크(T_p)와 전력을 생산하기 위하여 교류 발전기를 구동시키는 토크(T_{alt}), 그리고 엔진 마찰 토크(T_{EF})로 소모된다. 상기 항목들로 사용되고 남은 토크는 엔진의 크랭크축에 전달되며 이 토크는 토크 컨버터의 임펠러축에 전달되며, 댐퍼클러치가 미끄럼제어하는 동안에 엔진의 크랭크축에 전달된 토크는 임펠러축과 댐퍼클러치로 전달된다. 또한 엔진이 비정상상태로 운전되며 엔진의 관성항목(T_I)과 자동변속기의 댐퍼클러치손실(T_{DCL})로 소모된다. 그리고 이를 다음 식과 같이 정리 할 수 있다.

$$T_i - T_p - T_{EF} - T_{alt} - I_E \Omega_E = T_I + T_{DCL} \quad (1)$$

여기서, I_E 는 엔진의 각종 회전체와 토크 컨버터의 임펠러축의 관성을 집중 질량으로 고려한 엔진계의 질량관성모멘트를 의미하며 Ω_E 는 엔진의 회전속도를 나타낸다. 엔진계의 질량관성모멘트는 참고문헌⁷⁾에 의한 방법으로 구한 값을 이용하였다.

토크 컨버터의 터빈축을 거쳐 전달된 토크는 변속기 출력축을 거쳐 각각의 기어비에 따라 증가되고, 이 토크는 다시 최종 감속기구를 거쳐 차량의 차

륜에 전달된다. 이 과정을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$T_T + T_{DCL} = T_{DTF} + I_{DT,i} \alpha_{DT} + T_W \quad (2)$$

식 (2)에서 $I_{DT,i}$ 는 변속기 각 단수에 대한 구동계의 등가관성을 나타낸 것이며, 참고문헌⁷⁾에 의한 방법으로 구한 값을 이용하였다. 또한 위식에서 T_W 는 차륜에 전달된 토크를 의미한다.

각 단에 해당하는 구동계의 마찰토크는 다음식과 같이 구동계 회전속도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$T_{DTF} = C_{0,i} + C_{1,i} \Omega_{DT} + C_{2,i} \Omega_{DT}^2 \quad (3)$$

여기서, C는 차량 실험으로 구한 값을 이용하였다. 한편 차량의 구동차륜에 작용하는 토크(T_W)와 주행 부하 토크(T_V)의 차이가 차량의 구동력이 되며, 브레이크에 의해 작용하는 토크를 T_{BR} 라 한다면 이들의 관계는 다음과 같다.

$$T_W = T_{BR} + T_V \quad (4)$$

이를 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$(T_T + T_{DCL}) - T_{DTF} - I_{DT} \alpha_{DT} = T_{BR} + T_V \quad (5)$$

위 식에 사용되는 전체 차량의 주행 부하는 종류에 따라 다음과 같이 구분되어져 계산된다.

차량의 무게를 M_V 라 하고 차량이 a_V 로 가속 될 경우에, 관성력(F_I)은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$F_I = M_V a_V \quad (6)$$

가속저항은 가속 및 감속시에 생기는 관성저항이다.

또한 차량의 차륜에 작용하는 구름 저항과 공기 역학적인 저항을 하나의 항으로 다음식과 같이 차속의 함수로 표시하고 타행(cost down)시험으로 구한 계수를 이용하였다.

$$F_{RL} = C_0 + C_1 V + C_2 V^2 \quad (7)$$

따라서, 현재의 주행상황에 대하여 차량 외부에서 작용하는 주행부하는 다음과 같이 계산된다.

$$T_V = (F_{RL} + F_I) \cdot r_{eff} \quad (8)$$

여기서, r_{eff} 는 차륜의 유효 반경이다.

한편, 엔진의 가스 펌핑, 교류발전기 구동, 그리고

마찰에 소모되는 토크는 참고문헌⁸⁾의 모델링을 이용하였다.

또한 토크 컨버터 양단의 동력차로 발생하는 손실은 다음의 식으로 구한다.

$$\begin{aligned}
 P_{TCL} &= P_I - P_T \\
 &= T_I \Omega_I - T_T \Omega_T \\
 &= T_I \Omega_I (1 - SR \cdot TR)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

여기서 P 는 동력, T 는 토크, Ω 는 회전속도, SR 은 토크 컨버터의 속도비 (Ω_T/Ω), 그리고 TR 은 토크 컨버터의 토크비(T_T/T_I)를 의미하며, 하첨자 TCL 은 토크 컨버터 손실, I 는 토크 컨버터의 임펠러, 그리고 T 는 터빈을 나타낸다.

상기의 식 (1)~(9)의 관계식으로부터 구한 각부의 토크가 구해지면 그에 해당하는 동력을 구한 후, 다음과 같이 각부에서 소모된 연료량을 구한다.

$$m = \frac{1}{Q_{LHV,i}} \int_0^t P dt
 \tag{10}$$

여기서, $Q_{LHV,i}$ 는 연료의 저위발열량, t 는 적분시간, 그리고 P 는 동력을 의미한다.

2.2 차량 연비 시뮬레이션

차량의 요구속도와 요구가속도가 주어진 시간간격마다 입력되면 각종 동력 전달계 손실들을 계산하고 난 후, 엔진의 작동점을 구하여 연료소비량을 계산한다. Fig. 1은 이에 대한 흐름도이다.

첫 단계로 현재의 단수를 가정한 후, 주행저항, 변속기 마찰 토크, 그리고 관성항목 등을 계산하여 토크 컨버터의 터빈에 작용하는 토크를 계산한다. 또한 토크 컨버터의 터빈 회전속도는 기어비에 의하여 계산된다.

둘째 단계에서는 계산된 터빈 토크와 터빈 회전속도로부터 토크 컨버터의 임펠러 회전 속도 및 토크를 계산한다. 반복 루프를 통하여 계산이 수행되는데, 매칭되는 지점을 찾아내면, 엔진토크를 구한 뒤, 구한 엔진 회전속도와 토크로부터 스로틀 개도를 찾아낸다.

셋째 단계는 찾아낸 스로틀 개도와 차량속도를 근거로 변속알고리즘을 통하여 현재 가정한 단수가 맞는지 확인하고, 만약 단수가 맞지 않으면, 변속

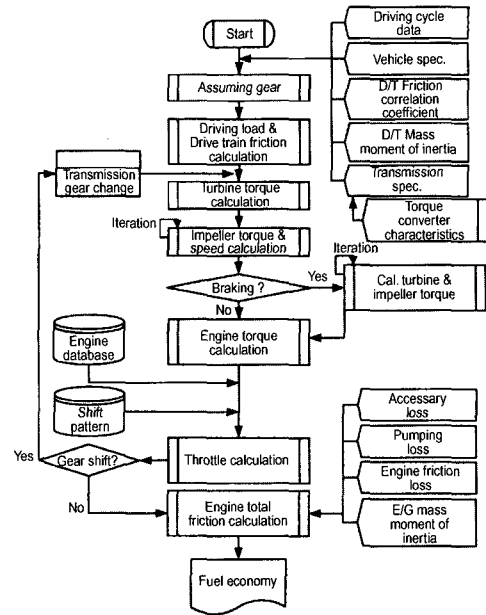


Fig. 1 Flowchart of the simulation program

을 한 후 앞의 알고리즘을 반복한다.

반면 가정한 단수가 맞으면 엔진에서 소요되는 펌핑, 교류 발전기 구동력, 엔진 마찰 및 관성항목을 구한 후 차량에서 소비된 연비를 계산한다.

정속주행은 차량의 속도가 일정하게 유지되는 상태에서의 시험이다. 이 경우 각각속도로 표시되는 시스템의 운동방정식은 모두 '0'이 된다. 즉, 정속주행 시뮬레이션은 주어진 속도에서 이러한 식들을 만족하는 스로틀 개도량을 찾는 문제로 귀착되며 상기된 알고리즘으로 매칭점을 찾아낼 수 있다.

한편 도시 주행 연비는 입력되는 속도 스케줄을 기준으로 정하여 이에 따라 차량을 운전하여 주행한 거리와 소모된 연료량으로부터 각 요소의 연비를 계산한다. 이러한 도시 주행 시험을 시뮬레이션하는 경우, 정하여진 속도 스케줄을 따라가도록 실제 시험에서와 같이 스로틀 개도와 브레이크 제동력을 적절히 제어하는 것이 필요하다. 이를 위하여 브레이크 제동력을 결정할 수 있는 알고리즘의 흐름도를 Fig. 2에 나타냈다.

입력된 속도 스케줄에서 한 단계 전의 속도로 차량의 관성에너지와 구동계 회전체의 관성에너지를 구한다. 이 차량 운동 에너지는 브레이크가 작동하지 않을 경우 저항 항목 즉, 주행저항과 구동계의 마

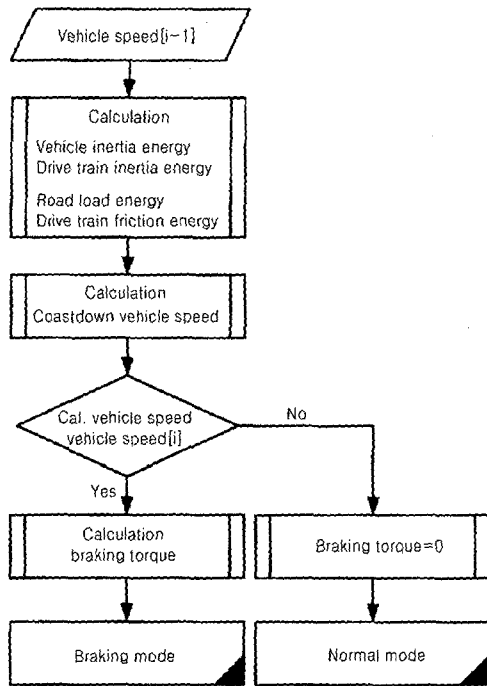


Fig. 2 Flowchart of the braking mode

찰항목에 의해 서서히 감소하다가 이 에너지가 '0'이 되면 차량은 정지하게 된다. 그러나 브레이크가 작동하게 되면 차량 운동 에너지는 이 보다 더 빠르게 감소하게 된다. 수동 변속기 차량의 경우, 저항 항목은 상기된 항목에 엔진 브레이크 항목이 추가 된다.

입력된 속도 스케줄에서 한 단계 전의 속도로 차량의 관성에너지와 구동계 회전체의 관성에너지를 구한다. 이 차량 운동 에너지는 브레이크가 작동하지 않을 경우 저항 항목 즉, 주행저항과 구동계의 마찰항목에 의해 서서히 감소하다가 이 에너지가 '0'이 되면 차량은 정지하게 된다. 그러나 브레이크가 작동하게 되면 차량 운동 에너지는 이 보다 더 빠르게 감소하게 된다. 수동 변속기 차량의 경우, 저항 항목은 상기된 항목에 엔진 브레이크 항목이 추가 된다.

이로부터 계산된 차량 속도가 입력된 차량 속도보다 크면 브레이크가 작동하는 상태이며, 작으면 차량은 가속 중이거나 정속주행 상태이며, 그리고 같으면 차량은 타행 주행 중이다.

만약 상술한 알고리즘으로도 매칭되는 지점이 나

타나지 않으면 토크 컨버터를 중심으로 엔진과 구동계는 각각 따로 운전되고 있는 상태를 의미한다. 이러한 상태는 ECU가 연료를 차단한 경우로 엔진은 모터링으로 운전되며, 더 이상 엔진의 상태를 파악할 수 없게 된다. 아울러 연료가 투입 되지 않기 때문에 연료량을 계산할 필요가 없게 된다.

3. 실험장치 및 실험방법

실험차량으로는 1.5L가솔린 엔진과 자동변속기가 장착된 전륜구동 방식의 승용차를 이용하였다. 차량에 설치한 실험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타냈다. 엔진에서 발생하는 토크를 측정하기 위해 각각의 실린더에 압력센서(AVL사, GU12P, spark plug type) 4개를 장착하였으며 전하증폭기(Kistler사, 5019A140)를 사용하여 증폭하였다. 엔진 회전속도는 1° 단위의 증폭축 엔코더(Metronix사, H40-0360ZV)를, 차륜 회전속도는 엔코더(Koyo사, TRD-J360-RZ)를 장착하여 측정하였다.

실험은 시뮬레이션 결과와 신호들을 비교하기 위해 fuel-cut, 변속, 타행주행 등이 포함될 수 있도록 임의로 주행하였으며, 아울러 투입된 총 연료량 비교를 위하여 사시동력계상에서 FTP-75 Hot Phase모드로 주행하였다.

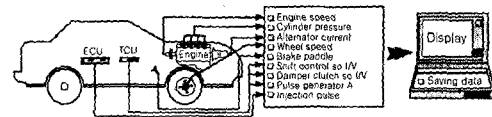


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus in vehicle

4. 결과 및 검토

시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 엔진 회전속도, 터빈 회전속도를 측정값과 비교하였으며, 차량 각 부에서 소모된 연료량은 비교적 그 영향이 큰 엔진 마찰, 토크 컨버터 손실, 그리고 차량 관성에 대해서만 실험결과와 비교하였다.

Fig. 4는 엔진 회전속도를 비교한 것이다. 전 영역에서 실험결과를 유사하게 따라가고 있음을 볼 수 있다. 그림에 표시된 'fuel-cut' 영역은 실험결과를 기준으로 표시한 것이며 이 영역에서는 엔진과 구동

계가 각각 따로 운전되고 있는 상태이며 연료분사가 중지되었기 때문에 연료량을 구할 필요는 없다.

Fig. 5는 터빈 회전속도를 실험결과와 비교한 것이다. 변속시점에서 다소의 차이가 나타나지만 전체적으로 유사함을 볼 수 있다.

Fig. 6은 엔진 마찰과 이에 의하여 소모되는 연료를 비교하였으며 비교적 실험결과와 유사함을 볼 수 있다.

Fig. 7은 토크 컨버터의 손실에 대한 시뮬레이션과 실험결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 실험결과를 잘 따라가고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 8은 차량 관성항목을 비교한 것이며 비교적 실험결과와 유사함을 볼 수 있다

이상과 같이 실험결과와 시뮬레이션과의 비교에 의해 전반적으로 유사함을 볼 수 있다. 또한 시뮬레이션 결과의 검증에 위하여 공식 연비 시험 모드 중 FTP-75 Hot Phase를 주행하여 총 투입된 연료를 비교하였다. 배기분석에 의한 결과와 시뮬레이션 결과의 총 투입된 연료는 약 4%이내의 오차로 비교적

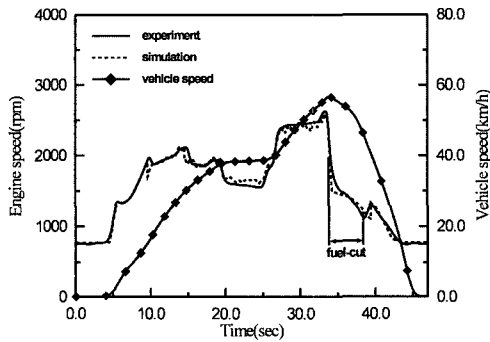


Fig. 4 C omparison of simulated and measured engine speed

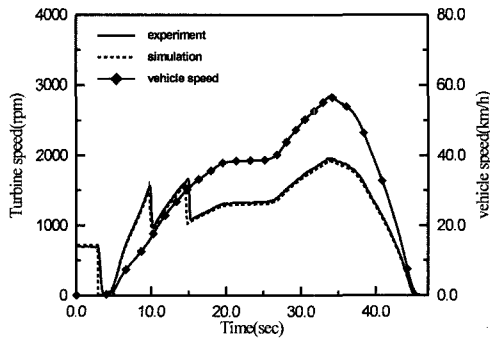


Fig. 5 C omparison of simulated and measured turbine speed

정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 9는 FTP-75 Hot Phase모드를 주행하였을 때 차량 각 부에서 소모된 연료량을 예측한 결과이다. 엔진에서 소비된 연료는 가스펌핑으로 3.7%, 교류발전기 구동으로 0.7%, 엔진 마찰 손실로 12.7%, 그리고 엔진 관성저항으로 0.7%가 소모되었다. 구동계에서는 토크 컨버터 손실로 4.6%, 구동계 마찰손실로 0.6%, 구동계 관성저항으로 0.04%, 구름저항 및 공기저항으로 9.2%, 그리고 차량 관성저항으로 13.4%가 소모 되었다.

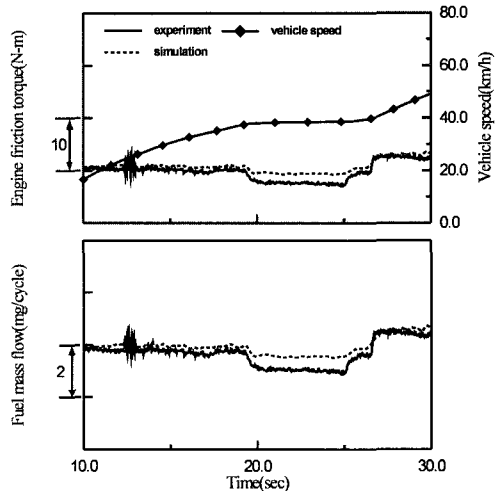


Fig. 6 Engine friction and consumed fuel mass by engine friction

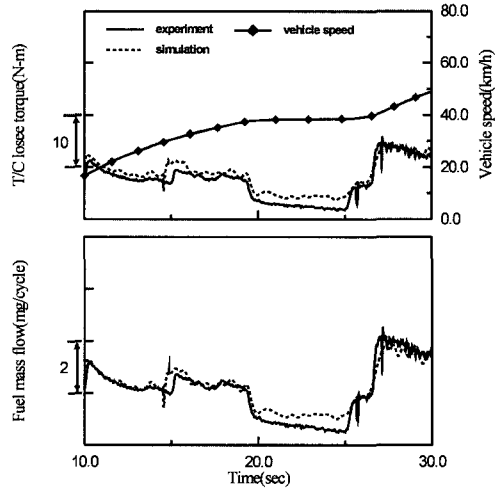


Fig. 7 Torque converter loss and fuel mass by torque converter loss

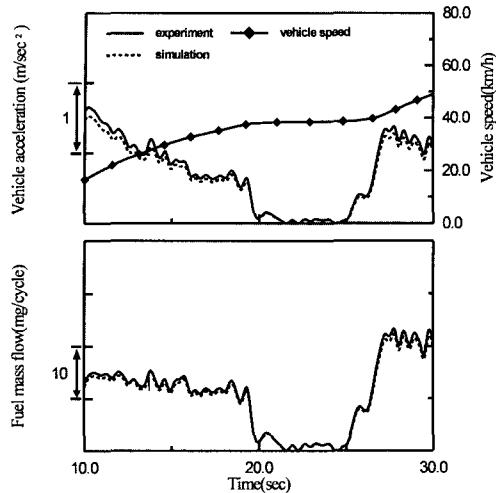


Fig. 8 Vehicle inertia consumed fuel mass by vehicle inertia

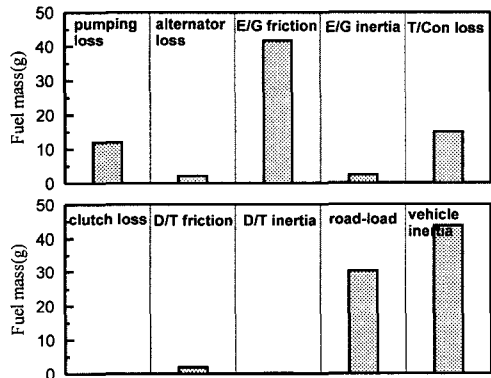


Fig. 9 Break down of fuel consumption for the FTP-75 Hot phase driving

작성된 시뮬레이션을 이용하여 차량 주행 연비에 영향을 미치는 토크 컨버터 용량계수와 공회전 회전속도를 변화시켜 이에 대한 영향을 검토하였다. Table 1은 선정된 인자의 변경사항을 정리한 것이다. 경우 '0'은 기본적인 상태이다.

Table 1의 경우 1과 같이 토크 컨버터의 용량계수를 변경시켜서 그 영향을 비교하였다.

Fig. 10은 시뮬레이션에 이용된 기존의 용량계수와 이보다 큰 용량계수⁹⁾를 비교한 그림이다.

Fig. 11(a)는 공회전 구간 동안 토크 컨버터 손실에 대한 항목을 비교한 것이다. 그림에서 처럼 용량계수가 큰 토크 컨버터의 경우가 보다 많은 연료를 소비하는 것으로 나타났다. 토크 컨버터의 용량계

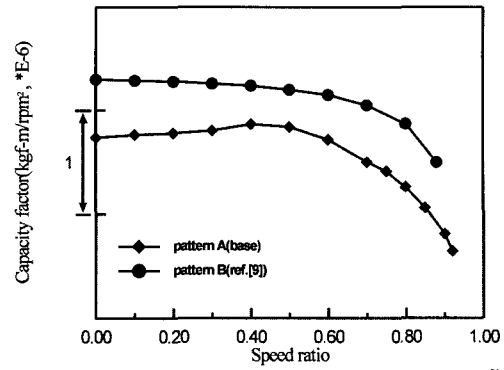


Fig. 10 Capacity factor of the torque converter from ref. 9)

Table 1 Simulation for case study

Case	Capacity factor	Idle Speed	Remark
0	Pattern A	750	Base
1	Pattern B	750	-
2	Pattern A	700	-

수가 커지면 임펠러 입력토크가 증가하기 때문에 증가된 만큼 임펠러 회전속도가 증가하게 되며 이로 인하여 토크 컨버터 자체의 손실에 악영향을 미치게 된다. 그러나 차량이 가속되는 시기에는 용량계수가 높은 것이 연비 측면에서 유리하다. 이는 임의의 엔진 회전속도에서 용량계수가 감당할 수 있는 값까지 터빈축으로 토크를 증배시켜 전달하기 때문이다. 따라서 최대한 토크증배구간을 이용하여야 적은 엔진의 힘으로 차량을 빠른 시간내에 가속 시키게 된다. Fig. 11(b)는 가속구간에서 관성항목에 해당하는 것을 비교한 것이다. 모든 항목에서 용량계수가 큰 토크 컨버터 장착 차량의 연비가 향상되었음을 볼 수 있다. Fig. 11(c)는 전체 주행 모드에 대한 연비를 비교한 것이다. 용량계수를 증가시킨 경우가 약 3.7%의 연비 향상을 나타냈다. 이는 토크 컨버터의 손실보다는 관성항목, 특히 차량 가속항목에서 연비 향상이 이뤄졌기 때문이다.

Fig. 12는 Table 1의 경우 '2'와 같이 엔진 공회전속도를 50rpm 낮추어서 시뮬레이션한 결과이다. Fig. 12(a)는 공회전 회전속도를 낮추었을 때 공회전 구간에서의 펌핑항목, 엔진 마찰항목 그리고 토크 컨버터 손실을 나타낸 것이며, Fig. 12(b)는 주행모드의 전 구간동안 투입된 연료량을 나타낸 것이다.

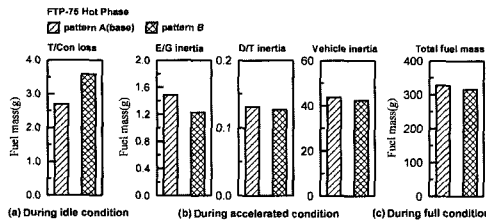


Fig. 11 Comparison of fuel consumption by capacity factor change

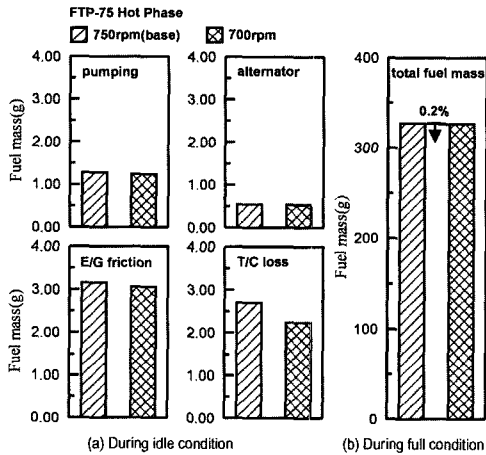


Fig. 12 Comparison of fuel consumption by idle engine speed change

Fig. 12(a)를 살펴보면 공회전 속도를 낮추었을 경우, 각 항목들에 사용된 연료의 합은 약 7.7%의 연료 절감의 이득을 볼 수 있다. 이는 Fig. 12(b)에 나타난 것처럼 총 투입된 연료면에서는 불과 0.2% 정도의 이득에 해당한다. 그러나 시험 주행 모드 중에서 공회전 시간이 많아진다면 이에 대한 연료이득은 보다 증가하게 될 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 차량 주행 후 소모된 총 연료가 구동계 각 부에서 어느 정도의 양으로 소모되는지를 예측하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 검증을 위하여 임의의 주행모드로 주행하여 각 부에서 소모된 연료량을 비교하였으며, FTP-75 Hot Phase모드를 주행하여 투입된 총 연료량을 실험결과와 비교한 결과, 비교적 정확하게 예측하였다.

또한 차량이 FTP-75 Hot Phase모드를 주행하였을 경우, 투입된 연료 중 차량관성(13.4%), 엔진 마찰(12.7%), 구름저항 및 공기저항(9.2%) 등의 순으로 연료가 소모되었음을 알 수 있었다.

본 시뮬레이션을 이용하여 토크 컨버터의 용량계수와 공회전 속도를 변화시켜 이에 대한 영향을 분석하였다. 먼저 용량계수를 증가시켜 FTP-75 Hot Phase모드를 주행한 경우, 공회전 상태에서는 엔진 회전속도가 증가하여 토크 컨버터 손실이 증가한 반면 가속상태에서는 토크중배구간을 많이 활용한 관계로 관성항목으로 소모된 연료는 감소하였다. 또한 공회전 속도를 감소시켜 같은 모드를 주행한 경우, 총 소모된 연료량에는 미비한 영향을 미치나 감소하는 결과를 확인 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 현대자동차(주)와 “국가지정 연구실 사업(NRL)”의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) F. An, M. Ross, “A Model of Fuel Economy and Driving Patterns,” SAE 930328, 1993.
- 2) S. H. Nasser, V. Weibermel, J. Wiek, “Computer Simulation of Vehicle Performance and Fuel Consumption under Steady and Dynamic Driving Conditions,” IMechE, C524/022/97, 1997.
- 3) G. Willmerding, “A Simulation System to Study the Working Conditions of Vehicles and to Develop Fuel Efficient Drivetrains,” ImechE, C389/323, 1992.
- 4) G. Gruber, W. Jordan, “Engine and Transmission Concepts for Future Fuel Economy Requirements,” ImechE, C394/034, 1990.
- 5) A. W. Phillips, D. N. Assanis, “Development and Use of a Vehicle Powertrain Simulation for Fuel Economy and Performance Studies,” SAE 900619, 1990.
- 6) H. S. Jo, J. M. Lee, Y. I. Park, W. S. Lim, “A Performance Simulation of Vehicle Powertrain for Fuel Economy and Driveability Analysis,”

- Transactions of KSAE, Vol.7, No.2, pp.408-423, 1999.
- 7) H. B. Song, Y. J. Choi, J. H. Lee, H. S. Cho, N. H. Cho, "An Experimental Study of the Improvement of Driveability in Vehicle Acceleration Mode," Transactions of KSAE, Vol.9, No.6, pp.65-75, 2001.
- 8) H. S. Jo, "Measurements and Modeling of In-Cylinder Residual Gas Fraction and Equivalence Ratio in an Spark Ignition Engine," Ajou- University, 1988.
- 9) H. D. Shin, Automatic & Continuously Variable Transmission, Goldenbell, 1999.