< 기술 논문 >

다운 스피딩이 NEDC 모드 연비에 미치는 기여도 산출에 관한 연구

심 범 주^{1,3)} · 박 경 석^{*2)} · 박 준 수³⁾

경희대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 경희대학교 기계공학과²⁾ · 쌍용자동차 기술연구소³⁾

Analysis of Down Speeding Effect on Fuel Economy during NEDC

Beomjoo Shim^{1,3)} · Kyoungsuk Park^{*2)} · Junsu Park³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kyunghee University, Gyeonggi 446-701, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Gyeonggi 446-701, Korea

³⁾R&D Center, Ssangyong Motor Company, 150-3 Chilgoi-dong, Pyeongtaek-si, Gyeonggi 459-711, Korea

(Received 18 November 2011 / Revised 18 January 2012 / Accepted 7 February 2012)

Abstract : Development trend of modern HSDI diesel engine is now focusing on low fuel consumption and emission because of strong interest in global environmental protection. Two big branches of criteria for modern diesel engine development are down sizing and down speeding. Down sizing keeps engine operation condition to the direction of higher load and thus pursuing for better thermal efficiency. But this may cause degraded vehicle dynamic performance because of reduced back up torque. Down speeding keeps engine operation condition to the direction of slightly higher load and lower engine speed. Therefore reduction of back up torque can be limited within flat torque area. This study analyzed fuel economy effect of down speeding on a vehicle powered by HSDI diesel engine in aspect of engine friction work, intake and exhaust pumping work, exhaust heat loss and thermal loss of fuel leakage of fuel injection system. Contribution factor of each engine and vehicle related parameters under basic and down speeding condition were compared and work balance of down speeding during NEDC was analyzed.

Key words : Down speeding(회전수 저속화), Down sizing(배기량 소형화), Pumping loss(펌핑 손실), Friction loss(마찰 손실), Exhaust heat loss(배기 열 손실), Indicated work(도시일)

1. 서 론

최근 디젤 엔진의 고압 분사 기술, 과급 기술, 배출 가스 후처리 기술 및 진동 소음 저감 기술이 비약적으로 발전하면서 디젤 엔진을 적용한 승용 차량의 보급이 급속하게 증가하고 있다. 여기에 자동차에서 배출되는 이산화탄소를 줄이려는 노력과 불안정한 국제 유가 및 석유 공급 문제로 말미암아 운전자들은 과거의 고효율 위주의 차량 선택에서 최근에는 연비와 효율에 더 많은 관심을 갖게 되었다.

더욱이 미국과 유럽의 연비 및 이산화탄소 배출

량 제한 규제는 날로 강화되고 있어 제도를 통하여 저효율 차량을 시장에서 퇴출시키려는 움직임이 매우 뚜렷하다. 이러한 영향으로 Fig. 1에서와 같이 유럽 연합에서 판매된 승용 차량의 경우 2000년대 이후로는 이산화탄소 배출량이 160g/km 이상인 고배출 승용 차량의 보급은 급격히 감소하는 반면 저배출 차량의 보급이 날로 증가하는 추세에 있다. 이와 같은 시장의 인식 변화와 규제 동향에 대응하기 위하여 디젤 엔진 부분에서 연비를 개선하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는데 이중 대표적인 기술이 다운 사이징과 다운 스피딩 기술이다.

다운 사이징 기술은 Fig. 2에서와 같이 엔진의 배

*Corresponding author, E-mail: ks2507@khu.ac.kr

기량을 줄이고 열효율이 좋은 고부하 운전 영역을 적극적으로 사용하는 개념이다. 그러나 이 기술은 엔진 개발에 많은 비용과 시간이 소요되며 부하 증가에 따른 질소산화물(NOx)과 연소 소음의 증대가 수반되는 단점이 있다.^{1,2)} 또한 실제로 주행시 여유 구동력이 감소되기 때문에 차량의 가속 성능이 저하되어 운전자가 저단 기어 위주로 운전시에는 실 주행 연비 개선 효과가 저하될 우려가 있다.

다운 스피딩 기술은 기어비 변경을 통하여 기관의 운전 조건을 고부하 및 저회전수 영역으로 이동시켜 연비 향상을 도모하는 기술이다. 다운 사이징 기술 대비 고부하 운전 영역으로의 이동량이 적기 때문에 열효율 향상 효과는 적지만 여유 구동 토크 저감이 적어서 중속 이상의 영역에서는 동력 성능 저하 또한 적으며 기관의 회전수 저속화를 통하여 추가의 도시 열효율 향상 효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 동일 차량 및 엔진 조건에서 기어비만을 변경하여 다운 스피딩을 구현하였고 기관

성능 인자 별로 열효율 향상 효과를 산출하는 연구를 시도하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

EU-5 대응형 2L급 디젤 기관이 장착된 6단 수동 변속기 적용의 소형 SUV 차량을 사용하였으며 다운 스피딩 효과를 산출하기 위하여 기존의 변속기 와(Gear Ratio A) 낮은 기어비가 적용된 변속기(Gear Ratio B)를 이용하였다. 낮은 기어비는 다운 스피딩으로 인한 차량의 동력 성능을 크게 저하시키지 않도록 기준 조건 대비 10% 수준 내외의 범위에서 설정하였다. Table 1과 Table 2는 본 연구에 사용된 차량 및 엔진의 제원과 최종 감속비의 상대비를 나타낸다.

Table 1 Specification of test vehicle and engine

Vehicle	Vehicle category	LDT N1 CL3
	Weight (GVW)	1,900 kg
	Gear box	6 speed manual
	Aftertreatment	DOC & DPF
Engine	Displacement / Cyl. No	2,000 cc/ 4 cyl.
	Valve No.	4 valves / cyl
	Fuel injection system	Common rail
	Emission capability	EU-5

Table 2 Comparison of final drive ratio

Gear	1	2	3	4	5	6
Gear Ratio A	100	100	100	100	100	100
Gear Ratio B	95.7	89.5	87.7	96.5	99.0	94.8

Fig. 1 EU Automotive market share trend by CO₂ emission³⁾

Fig. 2 Effect of down sizing & down speeding⁴⁾

2.2 실험 방법

차량 및 엔진 조건이 모두 동일한 조건에서 상기의 최종 감속비를 변경하면서 신 유럽 주행 모드 (NEDC)동안의 엔진 운전 조건의 변화를 비교하였고 연료 소모량 및 이산화탄소 배출량의 변화는 AVL사의 차대 동력계 및 배출 가스 측정 장치를 이용하여 배기관으로부터 배출되는 가스를 정용량 시료 채취 장치(CVS, Constant Volume Sampler)를 사용하여 비교 하였다. 기관의 회전수 및 토크를 포함한 기관 성능 관련 인자는 엔진 제어기의 신호를 이용하여 측정하였다. 운전 조건이 변화되면 배출 가

스 재순환율도 연동되어 변화하기 때문에 이에 따른 연료 소모율의 변동을 배제하기 위하여 배출 가스 재순환 밸브는 전폐한(close) 상태에서 실험을 실시하였다. 우선 각 경우의 조건에서의 누적 도시일과 제동일을 비교하였고 대상 상태에서 인테이크스로틀, 스윙 밸브, 터보 베인의 개도량과 흡입 공기 유량에 따른 흡배기 펌핑 토크 맵을 이용하여 NEDC 모드 주행 동안의 총 펌핑 손실일을 산출하였다. 엔진의 마찰일은 냉각수 온도와 엔진 회전수에 따라서 대상에서 기 측정된 마찰 토크 맵을 이용하여 총 마찰 손실일을 산출하여 비교하였다.

추가로 흡입 공기의 유량 및 온도와 배출 가스의 온도를 측정하여 배기 열손실을 비교하였으며 냉각수 및 연료 온도를 측정하여 냉각수와 연료를 통한 열손실을 상호 비교하였다.

3. 실험 결과

3.1 기관의 운전 조건

Fig. 3은 기준 조건과 다운 스피딩 조건에서 엔진 회전수 및 제동 평균 유효 압력(BMEP)의 분포를 나타낸다. 공회전을 제외한 전 운전 영역에서 다운 스피딩으로 인하여 저속 고부하 방향으로의 엔진 운전 조건이 이동되었음을 명확히 확인할 수 있다. 그러나 엔진 운전 조건의 분포는 NEDC구간 동안의 엔진 작동의 궤적만을 나타내기 때문에 각 영역에서 기관이 수행한 일의 양은 나타낼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 각 운전 영역에서 기관이 작동된 시간을 산출하고 이를 엔진 회전수 및 도시토크에 적용하여 운전 영역별로 기관이 수행한 도시일을 기준으로 다운 스피딩의 효과를 산출하였다. Fig. 4는 두가지 조건에서의 기관이 수행한 도시일량의 차이와 영역의 변화를 나타낸다. 다운 스피딩 조건에서는 공회전 영역을 제외한 전운전 영역에서 도시일 수행 영역이 저속 고부하 방향으로 이동된 것이 확인되었다. 특히 1000 rpm부근의 영역은 기준 조건 대비 새로운 도시일 수행 영역이 생성된 것으로 관찰되었고, 주요 도시일 수행 영역인 2000 rpm부근의 고부하 부근은 영역 변화가 뚜렷한 것으로 확인되었다. 이러한 엔진 운전 조건의 변화에 의해서 총 도시일량은 다운 스피딩 조건에서 416 kJ이

Fig. 3 Comparison of engine operation area during NEDC

Fig. 4 Comparison of indicated work [kJ] distribution

저감되었음이 확인되었으며 이와 소폭의 총 제동일량의 감소로 인하여 기준 조건 대비 7.2% 수준의 연료 소모량과 이산화탄소 배출량이 감소된 것으로 확인되었다.

3.2 제동일과 도시일

차량의 주행 저항과 운전 모드가 동일하고 구동계의 마찰을 무시한다면 기어비가 변경된다 하더라도 제동일의 변화는 없다. 본 연구에서 평가된 제동일은 다운 스피딩의 경우가 46.7 kJ이 낮은 0.78% 수준이 저감된 것으로 확인되었다. 이는 NEDC주행 구간에서 변속기 입력축의 총 회전수에 기인한 구동계 마찰 저감에 의한 것으로 사료된다. 그러나 도시일의 경우에는 엔진 회전수의 차이로 인한 마찰

Fig. 5 Comparison of accumulated indicated work

손실 및 흡배기 손실 등의 각종 손실에 의하여 3.7% 수준의 차이가 발생하는 것으로 관찰되었다. Fig. 5는 NEDC 모드 동안에 각 조건에서 기관이 수행한 누적 도시일을 나타낸다. 저속 구간의 UDC(Urban Driving Cycle) 보다는 고속 구간인 EUDC(Extra Urban Driving Cycle)구간에서 가시적인 차이가 발생하는 것으로 관찰되었는데 이는 NEDC 모드 중 주요 도시일 수행 영역이 70km/h 이상의 고속 구간이고, 특히 100km/h 이상의 6단 기어 주행 조건에서 다운스피딩 조건의 최종 감속비가 5% 이상 낮기 때문인 것으로 판단된다.

NEDC 모드 동안 기관의 총 싸이클 횟수는 기준 조건이 9,177 싸이클(UDC)와 5,226 싸이클(EUDC) 그리고 다운스피딩 조건이 8,451 싸이클(UDC)와 5,056 싸이클(EUDC)로 확인되어 전체 구간에서는 6.2%의 총 싸이클 횟수의 차이를 보이며 UDC 구간에서는 7.9%, EUDC 구간에서는 3.3% 수준의 차이를 보이는 것으로 확인되었다.

3.3 엔진 마찰 손실

엔진의 기계적 마찰일은 도시일 변화의 가장 큰 요인이 된다. 각 경우의 마찰 손실 비교를 위해서 냉각수의 온도와 엔진 회전수에 따른 엔진의 기계적인 마찰을 대상에서 미리 측정하여 기준 조건과 다운스피딩 조건에 적용하여 산출하였다. 이때 기관이 음의 일을 수행하는 감속시에는 연료 차단 기능을 고려하여 누적 마찰일 산출시 제외하였다.^{5,6)}

Fig. 6 Comparison of accumulated friction work & torque

Fig. 6은 NEDC 모드 동안에 각 경우의 기관의 마찰 토크와 누적 마찰일을 나타낸다. 마찰 토크는 저속 구간인 UDC구간에서 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 확인되었다. 이는 저속 구간이라 할지라도 저단의 기어 적용으로 인하여 엔진 회전수가 높고, 동시에 냉각수 온도가 낮기 때문에 마찰 토크의 차이가 크게 발생하는 것으로 판단된다.

NEDC 모드 동안에 기관의 누적 마찰일은 다운스피딩 조건이 기준 조건 대비 8% 수준이 낮은 것으로 확인되어, 다운스피딩으로 인한 기관의 도시일 저감에 가장 큰 영향을 미친 요인으로 판단된다.

3.4 펌핑 손실

다운스피딩의 경우에는 엔진 회전수가 낮기 때문에 동일 차속을 유지하기 위해서는 제동 평균 유효 압력(BMEP)이 높아야한다. 따라서 행정당 연료 분사량(FIPS)이 높고 연소시 필요한 흡입 공기량을 확보하기 위하여 과급 압력은 일반적으로 기준 조건 대비 다소 높은 수준을 보인다. 그러나 NEDC 구간 동안의 총 누적 흡입 공기량을 비교하면 다운스피딩의 조건에서는 기관의 총 싸이클 횟수가 적기 때문에 Fig. 7과 같이 누적 흡입 공기량은 낮은 것으로 관찰되었다. 본 연구에서 확인된 누적 흡입 공기량의 차이는 다운스피딩 조건이 8.5% 수준 낮은 것으로 확인되었다. 동일 흡배기 조건에서 총 누적 흡입 공기량이 적으면 흡배기 펌핑 손실이 감소하게 되어 결과적으로 연비 향상에 기여하게 된다. Fig. 8

Fig. 7 Comparison of accumulated intake air mass

Fig. 9 Comparison of exhaust heat loss & gas temperature

Fig. 8 Comparison of accumulated pumping work

는 NEDC 동안의 총 누적 펌핑 손실일을 도식한다.

다운 스피딩의 경우 행정당 흡입 공기량은 크지만 단위 시간당 흡입 공기량이 적고 기관의 총 싸이클 횟수가 적기 때문에 누적 펌핑 손실일은 기준 조건 대비 10.9% 수준이 낮은 것으로 확인되었다.

3.5 배기 열 손실

일반적인 내연기관의 경우 총 입력 열량의 약 30% 수준은 가용할 수 없는 배기 열 손실로 상실된다.^{7,8)} 배기 열 손실량은 식 (1)과 같이 흡입 공기와 분사된 연료의 질량 유량 및 흡기와 배기 가스의 온도 차이에 의해서 결정된다.⁹⁾

$$\dot{Q}_{exh} = (\dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel}) \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

Fig. 9는 흡입 공기와 배기 가스의 온도 차이 및 식 (1)에 의한 누적 배기 손실일을 나타낸다. 흡배기의 온도 차이는 전 구간에서 유사한 값을 보였으며 배기 손실일은 다운 스피딩의 경우가 241.0 kJ이 감소되어 기준 조건 대비 8.8%가 낮은 것으로 확인되었다. 이는 배기 가스의 온도는 유사한 수준이나 누적 흡입 공기의 양이 기준 조건이 높기 때문에 상대적으로 배기 손실이 높은 것으로 판단된다.

3.6 기타 열 손실

일반적인 내연 기관의 열 손실 요인 중 냉각열 손실은 배기 열손실과 더불어 가장 큰 손실 요인이다. 기관의 냉각수 온도는 냉각 손실 뿐 아니라 저온시에는 엔진의 마찰일의 변화에도 큰 영향을 미치기 때문에 신속하게 예열(warm-up) 될수록 연료 소모를 저감에 유리하다.

Fig. 10은 NEDC 구간동안의 냉각수 온도와 연료 온도의 거동을 나타낸다. UDC구간에서는 다운 스피딩의 경우가 보다 신속하게 예열되는 것으로 관찰되었고, EUDC 구간에서는 최대 일 소요구간인 100-120km/h의 가속 및 정속 구간에서 5°C 높은 것으로 확인되었다.

이는 다운 스피딩의 경우가 행정당 연료 분사량이 높기 때문에 연소실의 온도가 높고 이로 인하여 냉각수로의 열전달량이 증가하는 경향과 다운 스피딩에 의한 냉각수 펌프의 낮은 회전 속도에 기인한 것으로 사료된다. 결과적으로 높은 냉각수 온도는

Fig. 10 Comparison of coolant and fuel temperature

기관의 기계적 마찰을 저감하여 도시일 저감에 기여한 것으로 판단된다.

반면에 연료 온도는 기준 조건이 전 구간에서 점진적으로 증가하여 NEDC 종료시에는 5°C 높은 것으로 관찰되었다. 이는 인젝터의 특성상 분사를 위하여 솔레노이드 상면에서 누출 시키는 고압의 연료 압력이 대기압 수준으로 해제 되면서 연료의 내부 에너지가 열 에너지로 전환되면서 연료의 온도가 증가하는 현상으로 해석된다. 따라서 NEDC 구간 동안에 총 싸이클 횟수가 적은 다운 스피딩 조건에서 연료 분사 횟수가 적기 때문에 연료를 통한 열 손실이 적은 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 차량의 기어비를 변경하여 다운 스피딩을 구현하였으며 이에 따른 연비 저감 효과를 기관의 성능 인자 별로 산출하는 연구를 시도한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 다운 스피딩을 적용하더라도 이론적인 제동일의 변화는 없으나 변속기 입력축의 총 회전수의 영향으로 0.78% 수준의 미소한 저감이 확인되었다. 그러나 도시일은 기관의 총 싸이클 횟수, 마찰 손실, 흡배기 펌핑 손실등의 저감으로 총 3.7%가 감소되어 결과적으로 차량의 연비 저감에 기여한 것으로 판단된다.
- 2) 엔진의 마찰 손실은 낮은 엔진 회전수와 냉각수 예열 특성의 영향으로 기준 조건 대비 8% 수준

이 저감된 것으로 확인되었고, 특히 냉각수 온도가 낮은 UDC 구간에서의 저감이 큰 것으로 확인되었다. 다운 스피딩으로 인한 총 엔진 마찰 손실 일의 저감은 NEDC 모드 동안에 기관의 총 도시일 저감에 가장 큰 기여 요인으로 판단된다.

- 3) NEDC 모드 동안 기관이 흡입한 총 공기량은 다운 스피딩 조건이 기준 조건 대비 8.5% 수준 낮은 것으로 확인되었고 이로 인하여 누적 흡배기 펌핑 손실일은 10.9%가 저감되어 도시일 저감에 기여한 것으로 판단된다.
- 4) 배기 열 손실은 8.8% 수준이 감소 된 것으로 확인 되었다. 이는 기준 조건과 다운 스피딩 조건에서 배기 가스의 온도와 흡입 공기의 온도차는 유사한 반면 다운 스피딩 조건에서 누적 흡입 공기량이 감소된 원인으로 판단된다.
- 5) 냉각수의 예열 거동은 다운 스피딩 조건에서 행정당 높은 연료 분사량으로 인하여 연소 온도가 높고 이로 인한 냉각수로의 열 전달량의 증가 요인과 냉각수 펌프의 낮은 회전 속도로 인하여 기준 조건 대비 신속한 예열이 이뤄지며 예열된 이후의 온도도 기준 조건 대비 높기 때문에 기관의 도시일 저감에 기여한 것으로 판단된다. 다운 스피딩 적용시 연소실 내의 높은 연소 온도와 예열 후의 냉각수 온도가 기준 조건 대비 높기 때문에 질소 산화물(NOx)배출 특성에 대한 추가의 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- 6) 다운 스피딩 조건에서는 연료 분사 시스템의 총 분사 횟수가 감소되기 때문에 인젝터의 솔레노이드 상부에서 누출 시키는 연료의 양이 저감된다. 누출 된 연료의 압력은 대기압 수준으로 해제 되면서 연료의 내부 에너지가 열 에너지로 변환 되면서 연료의 온도가 증가하는데 기준 조건 대비 다운 스피딩 조건에서 연료 온도가 낮은 이유는 누출 연료를 통한 열 손실이 적기 때문인 것으로 판단된다. 다운 스피딩 적용시 인젝터의 누출 연료를 통한 열 손실 특성에 관한 추가적인 세밀한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

- 1) H. Choi and K. Min, "The Down-sizing for the

- Better Fuel Efficiency of HSDI Diesel Engines,” Auto Journal, KSAE, Vol.30, No.6, pp.28-33, 2008.
- 2) S. Park, H. Heo, S. Yoon and J. Chun, “Downsizing-concept EURO-V Diesel Engine Development for CO₂ Regulation,” Spring Conference Proceedings, KSAE, KSAE11-B0002, pp.8-16, 2011.
 - 3) European Automobile Manufacturers Association, European Automobile Industry Report 2009, pp.14-17, 2009.
 - 4) T. V. Johnson, “Diesel Emission Control in Review,” SAE 2009-01-0121, 2009.
 - 5) G. Lim, H. Wi, J. Park, J. Lee and K. Park, “Effect of Engine Friction on Vehicle Fuel Economy during Warm-up,” Transactions of KSAE, Vol.16, No.6, pp.109-114, 2008.
 - 6) M. Choi, J. Kim and S. Cho, “The Effect of Various Factors of Diesel Engine on Decreasing Fuel Consumption,” Conference Proceedings KSAE, KSAE08-S0064, pp.392-397, 2008.
 - 7) K. Park, H. Suh, S. Park, I. Kim and S. Jang, “Effects of Warm-up Performance on SI Engine with Exhaust Heat Recovery System,” Transactions of KSAE, Vol.19, No.6, pp.53-60, 2011.
 - 8) H. Suh, K. Kim, S. Jang and K. Park, “Study on the Warming-up Performance of the Engine with Exhaust Heat Recovery System,” Annual Conference Proceedings, KSAE, KSAE10-A0118, pp.713-720, 2010.
 - 9) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, pp. 262-271, 1988.