한국동력기계공학회지 제20권 제5호 pp. 60-65 2016년 10월 ISSN 1226-7813(Print) ISSN 2384-1354(Online)
Journal of the Korean Society for Power System Engineering http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2016.20.5.060
Vol. 20, No. 5, pp. 60-65, October 2016

상용차 변속기 내부 기어 경량화에 따른 연비 저감 효과에 대한 연구
Fuel Consumption Effect by Mass Reduction of Low Speed Transmission Gears in Commercial Vehicles

한성길* · 신유인** · 정종규*** · 송철기***†
Sung-Gil Han*, Yoo-In Shin**, Jong-Gyu Jeong*** and Chul-Ki Song****†

(Received 04 July 2016, Revision received 27 September 2016, Accepted 28 September 2016)

Abstract: Dynamic performance of transmission has a substantial effect on dynamic performance and fuel efficiency of a vehicles. Dynamic performance of transmission and mass moments of inertia of transmission gears are related directly each other. Then a smaller amount of kinetic energy from vehicles that repeat acceleration and deceleration requires lighter rotating part in transmission. It is going to increases fuel efficiency as a result. In this study, equivalent inertia moments of inertia at different speeds were calculated by simplifying the transmission system. To find out lightening effect at low speed level gear on fuel efficiency, the powerflow of transmission was analyzed. And the lightning effect of the rotating parts in transmission is compared with the mass reduction of sprung parts in vehicle.

Key Words : Kinetic energy, Sensitivity analysis, Effect of mass reduction, Transmission gear

— 기호 설명 —

eq. : 등가
I_V : Prandtl 수, ν/α
m : 질량
M : 차량 질량
R : 타이어 동반경
n : 기어 잇수
ω : 각속도
a : 가속도
k : 전위계수

하첨자

V : 차량
E : 엔진
m : 변속기 내부 메인 축
c : 변속기 내부 카운터 축
rev. : 후진 기어
S : 선 기어

****† 송철기(교신저자) : 경상대학교 기계공학부, 공학연구원
E-mail : cksong@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-1633
*한성길 : 경상대학교 기계항공공학부
**신유인 : 경상대학교 공학연구원
***정종규 : ㈜S&T중공업

****† Chul-Ki Song(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang National University.
E-mail : cksong@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-1633
*Sung-Gil Han: Department of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.
**Yoo-In Shin : ERI, Gyeongsang National University.
***Jong-Gyu Jeong : S&T Dynamics Co.

p : 유성 기어
R : 링 기어
d : 차동기어

1. 서 론

해를 거듭할수록 엄격해지는 차량 연비 규제에 발맞춰 차량의 연비 및 동적 성능을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1)]

변속기의 동적 성능은 차량의 동적 성능과 연비에 지대한 영향을 끼친다. 변속기의 동적성능은 회전체의 질량관성모멘트가 직접적으로 관여한다. 가벼운 질량을 가진 회전체는 가속 및 감속을 반복하는 차량에서 운동에너지를 적게 필요로 하게 되고 이는 곧 연비 증가 효과를 가지게 된다.

연비에 영향을 미치는 주요 인자로는 엔진 매핑, 터보차저, 동력계 윤활, 냉각성능 등을 말할 수 있으며, 국내외에서 이와 같은 인자에 대한 연구가 활발히 수행되어져 왔다.

류명석[2)] 등의 연구에서는 상용차용 디젤엔진 매핑을 통해 연비 향상을 도모하였다. Will[3)]과 Margareth[4)]의 연구에서는 동력계동 윤활을 통해 연비를 향상시키는 방법을 제시하였다. 또한 류명석[5)]의 연구에서는 엔진과 주변 부품의 최적 냉각을 통해 연비향상을 도모하였다.

상기와 같은 연구들에서 연비 향상을 위한 여러 인자에 대한 연구가 이루어져 왔으나, 변속기의 동적 성능이 연비에 미치는 영향을 수치적으로 연구한 사례는 찾아보기 어렵다.

따라서 본 논문에서는 변속기 시스템을 간략화하여 각 단수별 등가관성모멘트를 도출하였다. 유성기어 감속비를 가지는 저단기어 영역의 경량화가 연비에 미치는 영향을 알아보기 위해 동력전달 경로를 분석하여 저단기어에서 사용되는 기어를 선정하였다. 이 기어를 기능은 유지하면서 질량을 가지지 않는 이상적인 상태로 가정하였다. 변속기 내부 회전체 질량 감소량과 같은 양의 현가상질량을 감소시켜 연비 향상효과를 상호 비교하였다.

2. 변속기 특성 분석

본 논문의 연구대상 차량은 12단 변속기를 탑재하고 있는 차량으로서 주요 회전 파트는 입력축, 카운터 축, 메인 축, 유성기어, 차동기어로 구성되어있다. 그 중 12단 변속기에 대한 부분을 Fig. 1에 간략화 하여 나타내었다. 아래첨자 E는 입력 축과 두 기어를 포함한 엔진, m은 변속기 메인샤프트, c는 카운터샤프트, rev는 후진 기어를 말하며, 대문자 M은 차량의 질량, R은 타이어의 동하중 반경을 말한다.

회전부분은 기어비의 함수이다. 바퀴를 포함하여 엔진, 클러치, 기어박스, 추진축 등에 있는 회전요소들의 질량관성 모멘트는 구동축을 중심으로 하는 등가관성모멘트로 변환된다. 최종출력인 타이어의 관점에서 기어비를 고려한 변속기의 등가관성모멘트는 식 (1)과 식 (2)로 도출할 수 있다. 여기서 i와 j는 각각 i, j번째 기어 단수를 의미하며 유성기어의 감속비 생성 여부에 따라 단수를 구분하였다. 또한 수식에서 기어비는 해당 기어 단수의 동력 전달 경로에 따라 변화한다.

$$I_{V.eq\,i} = I_V + MR^2 + I_{P.eq1}\left(\frac{n_V}{n_d}\right)^2 + I_m\left(k \cdot \frac{n_V}{n_d}\right)^2 + I_c\left(\frac{n_{mi}}{n_{ci}} \cdot k \cdot \frac{n_V}{n_d}\right)^2 + I_E\left(\frac{n_{ci}}{n_{mi}} \cdot \frac{n_{mi}}{n_{ci}} \cdot k \cdot \frac{n_V}{n_d}\right)^2 + I_{rev}\left(\frac{n_{ci}}{n_{rev}} \cdot \frac{n_{mi}}{n_{ci}} \cdot k \cdot \frac{n_V}{n_d}\right)^2 \quad (i = 1, 2, \cdots, 6, rev) \tag{1}$$

$$I_{V.eq\,j} = I_V + MR^2 + (I_m + I_{P.eq2})\left(\frac{n_V}{n_d}\right)^2 + I_c\left(\frac{n_{mj}}{n_{cj}} \cdot \frac{n_V}{n_d}\right)^2 + I_E\left(\frac{n_{cj}}{n_{mj}} \cdot \frac{n_{mj}}{n_{cj}} \cdot \frac{n_V}{n_d}\right)^2 + I_{rev}\left(\frac{n_{cj}}{n_{rev}} \cdot \frac{n_{mj}}{n_{cj}} \cdot \frac{n_V}{n_d}\right)^2 \quad (j = 7, 8, \cdots, 12) \tag{2}$$

3. 변속기 특성 분석

유성기어 시스템은 선 기어, 유성 기어, 링 기어로 이루어져 있으며, 고정되는 파트에 따라 입력과 출력 축, 기어비, 회전 방향이 변화하는 특성이 있다.

본 논문에서 언급한 유성기어 시스템은 다단 변속기 말미에 부착되어 다양한 기어비를 생성하게 하는 주요 부품이며, 링 기어의 고정 여부에 따라 전체 기어비와 구동 매커니즘이 달라진다.

1~6속 및 후진 상태에서 링 기어가 고정되어 감속비를 생성하며, 7~12속에서는 유성기어 시스템 전체가 회전함으로써 감속비를 생성하지 않는다.

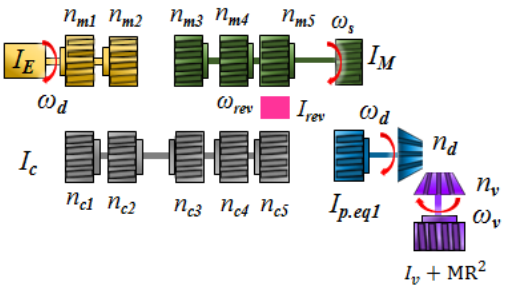

Fig. 1 Simplification of the multistep transmission system

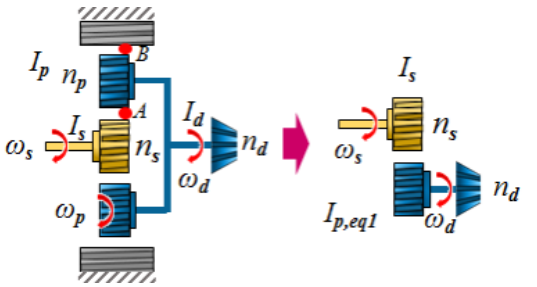

Fig. 2 Free body diagram of planetary gear system when 1~6 speed and reverse gear

3.1 1속~6속 및 후진 상태 변속기의 등가관성모멘트

1~6속 및 후진 상태에 대한 유성기어 시스템의 간략화 모델은 Fig. 2와 같이 나타내었다.

기어잇수와 전위계수를 이용하면 링기어의 기어잇수는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_R = n_S + 2n_P + (2k_S + 4k_P - k_R) \tag{3}$$

유성기어의 지름조건 및 속도 식에 의해 각 이어의 접촉점 A와 B에서 회전속도는 같아야 하므로 식 (4)와 식 (5)를 만족한다.

$$w_S = \frac{2(n_S+2k_S+n_P+2k_P)}{n_S+2k_S} w_d \ (\text{at } A) \tag{4}$$

$$w_P = -\frac{n_S+2k_S+n_P+2k_P}{n_P+2k_P} w_d \ (\text{at } B) \tag{5}$$

1~5속 및 후진 상태의 등가관성모멘트는 운동에너지 식을 이용하여 도출할 수 있으며, $I_{P.eq1}$은 감속비를 가질 때 유성기어 시스템의 등가관성모멘트를 의미한다.

$$I_{P.eq1} = I_d + m_P r^2 + I_P\left(1 + \frac{(n_S+2k_S+n_P+2k_P)^2}{(n_P+2k_P)^2}\right) \tag{6}$$

3.2 7속~12속 상태 변속기의 등가관성모멘트

7~12속에 대한 유성기어 시스템의 간략화 모델은 Fig. 3과 같이 나타내었다.

$I_{P.eq1}$과 동일한 방법으로 식 (7)을 도출할 수 있으며, $I_{P.eq2}$는 감속비를 가지지 않을 때 유성기어 시스템의 등가관성모멘트를 의미한다. 이 상태에서는 유성기어 시스템 전체가 회전하므로 $\omega_s = k\omega_d$ 이 되고 $k = 1$이 된다.

$$I_{P.eq2} = I_p + m_P r^2 + I_d + I_R \tag{7}$$

4. 경량화 기어 선정

식 (1)과 식 (2)에서 저단 기어의 기어비가 각 속도의 질량 관성 모멘트에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 저단

기어의 유성기어가 작동하여 기어비를 생성하는 단수를 경량화 범위로 정하였다. Fig. 4에 각 단수별 동력전달 경로를 나타내었다. Fig. 4를 통해 저단에서 사용되는 기어를 확인할 수 있는데, 저단에서 사용되는 기어는 n_{m1}, n_{m2}, n_{m3}, n_{m4}, n_{c1}, n_{c2}, n_{c3}, n_{c4} 이다. 변속기 내부 회전체의 경량화에 대한 효과를 검증하기 위해 언급한 8개 기어를 기능을 유지하면서 질량은 최소화시킨 이상적인 상태로 가정하였다.

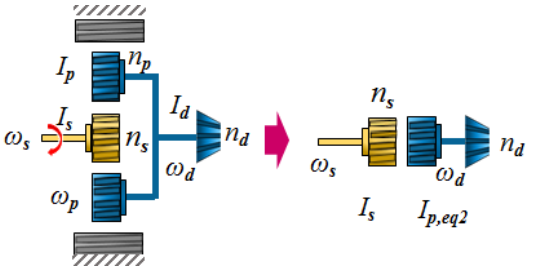

Fig. 3 Free body diagram of planetary gear system when 7~12 speed gear

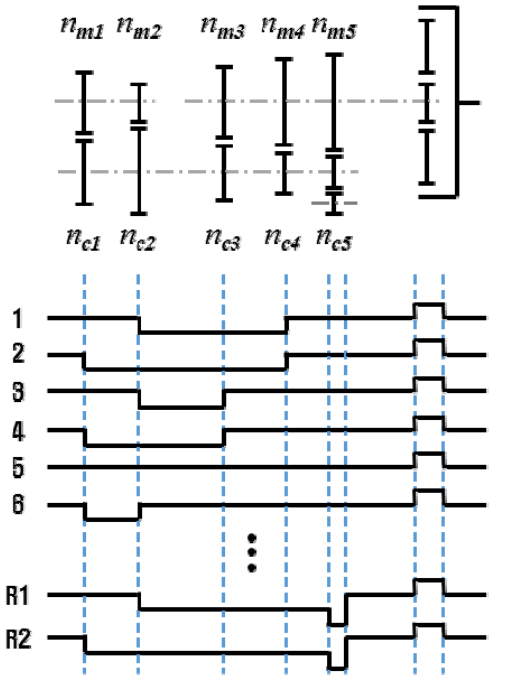

Fig. 4 Powerflow diagram of low level and reverse speed

5. 연비 계산

어느 순간적인 작동점에서 연료소비율 b_e는 일정 연료소비율 특성 곡선들이 그려져 있는 엔진 성능 지도(BSFC)에서 읽을 수 있다. 엔진 성능 지도는 동일한 에너지 소비점을 연결하여 등에너지 곡선으로 나타나 있으며, Fig. 5의 등고선과 같은 선이 등에너지 곡선을 의미한다.

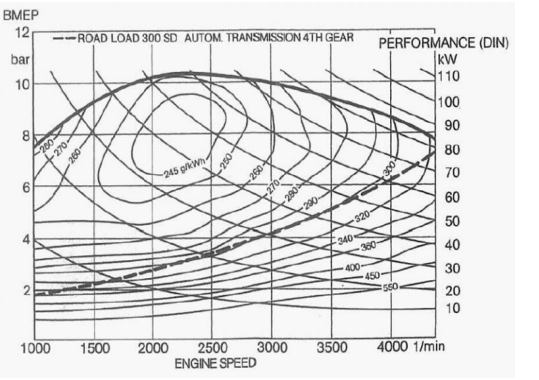

Fig. 5 BSFC of Mercedes-benz's diesel engine

본 연구대상은 상용차이므로 상용 디젤 엔진 성능 곡선을 이용해야하나 엔진 성능 지도는 제조사에서 쉽게 공개하지 않는 기밀에 해당하는 부분이다. 따라서 연비 계산을 위하여 이미 공개된 메르세데스 벤츠 3,000 cc 디젤 엔진(OM618)의 엔진 성능 지도[6]를 참고하였다. 이 엔진 성능 지도에서 가상의 12단 변속 지점을 생성하여 데이터를 생성하였으며 그 값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Fuel consumption of each speed

speed	fuel consumption [g/kWh]
1 speed	640
2 speed	590
3 speed	585
4 speed	540
5 speed	505
6 speed	465

Table 2 Compare the fuel efficiency with the T/M internal mass and sprung mass

step	fuel efficiency [km/l]		
	original	lightning of T/M internal mass	lightning of sprung mass
1 speed	0.458	0.466	0.460
2 speed	0.498	0.506	0.500
3 speed	0.506	0.511	0.508
4 speed	0.549	0.554	0.551
5 speed	0.588	0.592	0.591
6 speed	0.639	0.643	0.641
rev-low	0.459	0.466	0.461
rev-high	0.460	0.467	0.462
Total	4.157	4.205	4.174
-	-	1.17%	0.4%

단위 거리당 연료소비량 b_s는 식 (8)과 같이 계산될 수 있다.

$$b_s = \frac{b_e P(n_M)}{\rho_{fuel} v} = \frac{b_e F_{Z,B}}{\rho_{fuel}} \quad [l/km] \tag{8}$$

식 (8)에서 $F_{Z,B}$는 전체 주행저항으로써 구름저항, 공기저항, 구배저항, 가속저항을 모두 더한 값이다. 본 논문에서는 변속기 내부 회전체가 연비에 미치는 영향을 알아보기 위함이므로 구름저항, 공기저항, 구배저항은 배제하고 가속저항을 고려하였다.

회전체 부분의 질량관성모멘트를 $\sum I_{V.eqi}$, 가속도를 a라 할 때 가속저항 F_a는 식 (9)와 같다.

$$F_a = m_{red,i} a \tag{9}$$
$$(m_{red,i} = M + \frac{\sum I_{V.eqi}}{R^2})$$

변속기 내부 회전체에 대한 경량화가 연비에 미치는 영향을 확인하기 위하여 경량화가 이루어지지 않았을 때의 연비, 내부 회전체에 대한 경량화가 이루어졌을 때의 연비, 현가상질량(sprung mass)에 대한 경량화가 이루어졌을 때의 연비를 비교하여 Table 2에 나타내었다. 참조한 엔진성능지도 값의 영향 때문에 저단 영역에서의 연료 효율은 현재 운행 중인 25 ton 상용차보다 낮은 값을 가지고 있다. 하지만 저단 영역에서의 높은 기어비 때문에 경량화에 따른 연비 개선 효과가 높은 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 12단 변속기를 장착한 상용차에서 저단기어의 질량관성모멘트가 연비에 미치는 영향을 연구하였다. 저단기어의 질량감소와 현가상질량 감소가 연비에 미치는 영향을 비교하였다.

변속기 내부 회전체의 질량의 감소량은 차량 전체 무게의 약 0.8%인데 비하여 연비 향상 효과는 기존 대비 약 1.17% 향상 효과를 보였다.

이와 같은 결과를 비교하여 볼 때 회전체의 질량감소효과가 병진 운동을 하는 질량 감소 효과보다 약 3배가량 큰 것을 알 수 있다. 특히 변속비가 커질수록 그 효과는 더 큰 것으로 알 수 있다.

후 기

본 연구는 교육부와 한국산업기술진흥원의 ‘지역혁신인력양성사업’과 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 ‘수출전략형 FGCV 연구개발사업’의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

References

1. M. G. Kong, C. K. Song and Y. D. Kim, 2011, "Strength Design Evaluation of the Multi-range Transmission", Journal of the KSPSE, Vol. 15, No. 3, pp. 12-17.
2. M. S. Lyu, B. M. Doo and Y. G. Ku, 2007, "A Study of the Fuel Economy Improvement of a Heavy Duty in Commercial Vehicle(Ⅰ)", Transactions of KSAE, Vol. 16, No. 5, pp. 44-48.

3. Will F. and Boretti A., 2011, "A New Method to Warm Up Lubricating Oil to Improve the Fuel Efficiency During Cold Start", SAE International Journal of Engines, Vol. 4, No. 1, pp. 175-187.
4. M. J. S. de Carvalho, P. R. Seidl, C. R. P. Belchior and J. R. Sodre, 2010, "Lubricant Viscosity and Viscosity Improver Additive Effects on Diesel Fuel Economy", Tribology International, Vol. 43, No. 12, pp. 2298-2302.
5. M. S. Lyu, 2007, "Vehicle Fuel Economy Improvement by Studies on the Engine Cooling and Ancillaries System of the Heavy Duty Engine", Transactions of KSAE, Vol. 15, No. 3, pp. 79-84.
6. K. Oblander, M. Fortnagel, H. J. Feucht, and U. Conrad, 1978, "The Turbocharged Five-Cylinder Diesel Engine for the Mercedes-Benz 300 SD", SAE Technical Paper No. 780633.
7. S. G. Han, Y. I. Shin, C. H. Yoon and C. K. Song, 2014, "Strength and Durability Analysis of the Double Planetary Gears", Journal of the KSMPE, Vol. 13, No. 5, pp. 28-34.
8. H. J. Kim, J. H. Moon, J. S. Yu and Y. S. Lee, 2013, "Performance Analysis of an Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery of a Passenger Car", Journal of the KSPSE, Vol. 17, No. 2, pp. 87-94.