

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.11.963>

ISSN 1226-4873(Print)

2288-5226(Online)

연비 향상을 위한 반력 생성형 에코페달의 설계와 성능검증

김 지 수* · 탁 태 오**

* 강원대학교 기계의용공학과

Design and Performance Validation of Tactile Force Generating Type Eco-pedal to Improve Fuel Economy

Ji Soo Kim* and Tae Oh Tak**

* Dept. of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

(Received May 23, 2016 ; Revised May 31, 2016 ; Accepted September 1, 2016)

Key Words: Tactile Force Generating Eco-pedal(촉각형 에코 페달), Control Logic(제어로직), Pedal Reaction Force(페달 반력), Fuel Consumption(연료 소비량), Driving Test(실차주행시험),

초록: 본 연구는 가속페달에 반력을 생성하여 운전자의 경제운전을 유도하기 위한 에코페달의 설계와 성능 검증을 다룬다. 에코페달의 제어로직은 사전에 설정된 “허용가속도”를 바탕으로 현재 속도에서 허용되는 연료소비량을 정하고 이를 실제 연료소비량과 비교하여 에코페달의 작동을 결정하는 방식을 제안하였다. 페달 반력은 운전자가 충분히 인지하되 불쾌감을 느끼지 않아야 하며, 차량의 정상 거동에 간섭이 없어야 한다. 스텝형과 램프형 반력 등과 같이 페달 답력이 급속하게 증가하는 형태의 반력은 반력 작동이 멈춘 직후 운전자의 답력에 의한 급작스러운 가속 현상 때문에 적용이 어렵고, 이러한 문제가 없는 진동형 반력을 채택하였다. 진동형 반력의 주파수, 진폭, 작동시간은 운전자의 주관적 평가와 연비 향상 효과를 고려하여 결정하였다. 본 연구에서 제안된 에코페달을 차량에 장착하여 주행시험을 실시한 결과 고속도로와 시내주행에서 각각 13%와 15%의 연비향상 효과를 보여주었다.

Abstract: This research deals with design and performance validation of eco-pedals that generate tactile pedal force to guide fuel saving driving behavior. For eco-pedal control logic, allowable fuel consumption at given driving speed is calculated based on pre-defined “allowable acceleration”, and if the actual fuel consumption exceeds the allowable fuel consumption, then pedal force is activated. Pedal force should be recognizable to driver while not causing unpleasantness, and should not interfere with normal operation of pedal. Reaction forces that increase pedal stiffness abruptly, such as step and ramp shape, turn out to be not suitable due to pedal overshoot after release of reaction force. With this regards, vibration type reaction force is adopted, and its optimal frequency, magnitude and duration is determined through subjective evaluation with consideration to effect to fuel efficiency. Though highway and city driving test, it is demonstrated that fuel efficiency increase of 13% for highway and 15% for city is achieved.

1. 서 론

자동차의 연비는 운전자의 운전 습관에 큰 영향을 받는다. 급가속이나 급제동 등 연비에 부정적인 영향을 주는 운전습관을 억제하여 경제운전을 유도하고 위해서 다양한 경제운전 보조 장치

가 개발되고 있다. 경제운전 보조 장치는 크게 보아 두 가지로 구분되는데, 첫 번째는 순간연비 또는 일정한 시간 동안 평균 연비, 급가속 회수 등을 측정하고 이를 계량화하여 종합적인 경제운전 지표를 계기판에 표시하거나 시각 및 청각 신호로 전달하여 경제 운전을 유도하는 것이다. 이러한 유도장치는 비교적 단순하고 큰 비용이 들지 않으므로 비교적 많은 차량에 채택되고 있다.

† Corresponding Author, totak@kangwon.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

두 번째 방식은 경제운전 정보만 제공하는 것이 아니라 운전자가 급가속 등 경제운전에 부정적인 영향을 미치는 운전을 할 때 페달에 반력을 생성하여 운전자에게 적극적인 경제운전을 유도하는 방식으로 이러한 페달을 일반적으로 에코 페달(eco-pedal)이라고 부른다.

경제운전 장치와 관련하여 다수의 연구가 진행되었다. 신동진 등⁽¹⁾은 연비 향상을 위한 경제 운전 안내 시스템을 개발하였는데, 실제 도로에서 엔진과 변속기의 작동 상태와 속도와 가속도 등의 운전 상태를 바탕으로 경제운전 상태를 표시하는 장치를 개발하였다. 백운석 등⁽²⁾은 3차원 지도 정보를 이용하여 도로 경사를 고려한 연료 소비량을 계산하고 이를 바탕으로 최적 속도로 주행하기 위한 알고리즘을 제시하였고, 시뮬레이션을 통하여 타당성을 입증하였다. 최성철 등⁽³⁾은 고속도로에서 GPS를 이용하여 고도를 고려한 경로 데이터를 이용하여 연비를 향상시키기 위한 정속 순항 알고리즘을 연구하였다. GPS를 이용하여 주행하고자 하는 경로와 고도 데이터를 취득하여 미리 차량에 입력한 후, GPS 수신기를 장착한 차량이 동일한 도로를 주행하면 도로경사를 고려하여 최적 속도를 계산하고 현재의 속도와 비교하여 속도를 수정하는 방식이다.

일본 닛산 자동차의 Sakaguchi 등⁽⁴⁾은 운전자의 과도한 가속이 예측되면 사전에 가속 페달에 반력을 발생시켜 경제운전을 유도하는 에코 페달에 대한 이론적 근거를 제시하고 이를 바탕으로 에코 페달을 개발하여 차량에 적용하였다. Fors 등⁽⁵⁾은 트럭 운전자의 운전 환경과 운전 동작을 고려한 경제운전 유도장치의 유용성을 평가하고 이를 바탕으로 운전자 인터페이스의 설계방법을 제시하였다.

본 논문에서는 운전자가 미리 설정된 한계를 초과하는 가속을 하는 경우 페달에 반력을 생성시키는 촉각형 운전자-페달 인터페이스에 의해서 경제 운전을 유도하는 에코 페달의 설계를 위한 이론과 시제품의 성능 검증을 다룬다. 차량의 주행상태와 노면 경사를 고려하여 반력 작용 여부를 결정하기 위한 제어로직을 제시한다. 에코페달의 성능은 반력의 형태에 큰 영향을 받는데, 다양한 형태의 반력에 대한 실험적 분석과 운전자의 주관적 평가를 통하여 연비 향상과 운전자 인지성과 선호도가 최적화된 반력을 제안한다. 에코

페달을 실제 차량에 적용하여 시내와 고속도로 주행 시의 연비향상 효과를 검증하고자 한다.

2. 에코 페달의 제어로직

에코 페달을 설계하는데 있어서 우선적으로 결정해야 할 것은 에코 페달의 작동시점을 결정하는 것이다. 본 연구에서는 차량에서 제공되는 정보인 속도와 연료소비량(혹은 동일한 개념으로 쓰로틀 개방량)을 이용한 제어로직을 제안하고자 한다.

차량의 연료소비량은 주행속도와 가속도에 의해서 결정된다. Fig. 1은 국산 SUV차량에 대해서 측정한 속도-가속도-쓰로틀 상대 개방량(쓰로틀 최대 개방량에 대한 현재 개방량 비율의 퍼센트)의 상관관계를 나타낸다. 동일한 주행 속도에서도 가속도에 따라서 연료 소비량이 변화하는 것을 보여주고 있다. 따라서 주어진 속도에서 경제운전의 관점에서 허용되는 가속도의 크기(여기서 “허용가속도”라고 정의)가 미리 결정되면 허용 가능한 쓰로틀 개방량을 알 수 있고 실제 쓰로틀 개방량이 허용 가능 쓰로틀 개방량 보다 큰 경우 에코 페달이 작동된다.

에코페달에서 허용가속도의 크기는 임의로 설정할 수 있는데, 작은 값을 선택하면 에코페달이 자주 작동하여 상대적으로 큰 연비향상 효과를 기대할 수 있으나 운전자의 입장에서는 불편하게 느낄 수 있으므로 이 값은 연비와 운전자의 선호도 모두 고려하여 결정되어야 한다.

만약 차량이 평지가 아니라 경사각이 α 인 노면을 오르는 경우에 허용가속도 a 는 노면경사각 α 를 고려하여 다음과 같이 보정되어야 한다.

$$a = a + g \sin \alpha \quad (1)$$

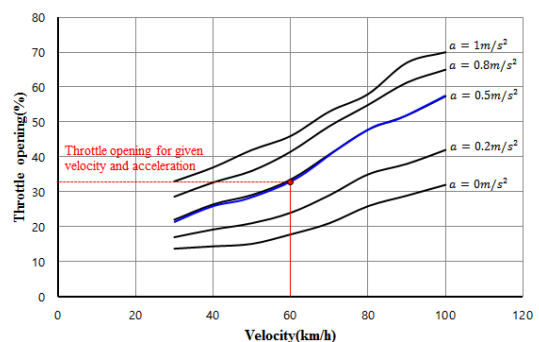


Fig. 1 Relation between velocity, acceleration and throttle opening

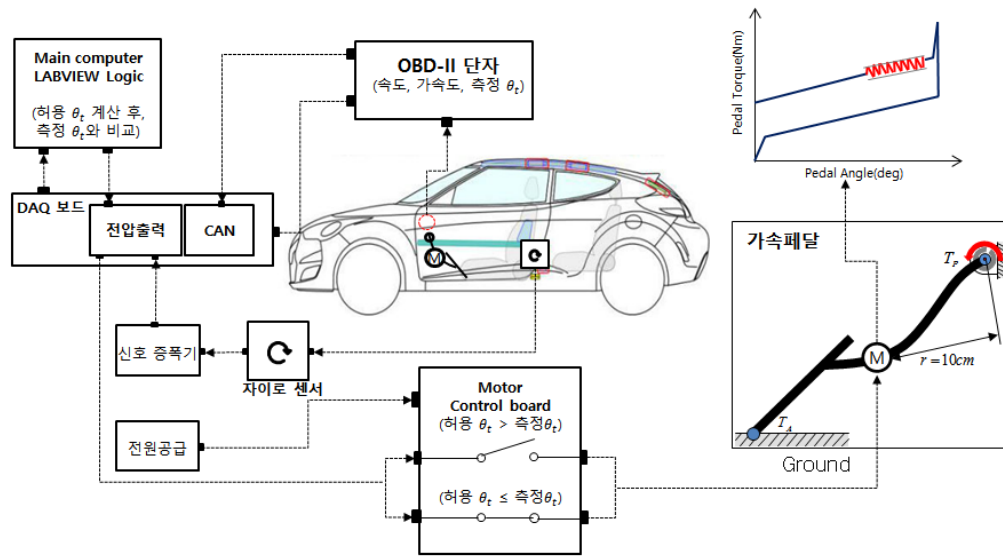


Fig. 2 Determination of eco-pedal operation threshold and signal flow

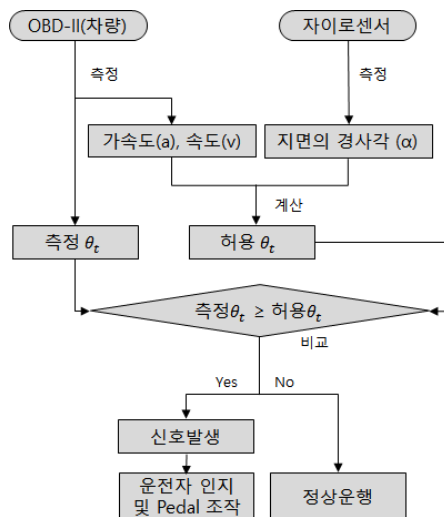


Fig. 3 Control flow for determination of operation threshold of eco-pedal

Fig. 2는 에코페달 작동을 위한 신호 흐름도를 보여준다. 우선 차량의 OBD-II 단자로부터 속도, 쓰로틀 개방각 θ_t 와 자이로센서를 이용하여 노면 경사각 α 를 구한다. 이 값이 구해지면 Fig. 3의 제어로직 흐름도와 같이 경제운전 허용가속도 (a)를 이용하여 Fig. 1의 그래프에서 허용 가능 쓰로틀 개방각 θ_a 를 계산하고 이를 측정된 쓰로틀 개방각을 비교하여 에코페달의 작동여부를 결정한다. 속도 30 Km/h 이하에서는 감가속이 빈번하게 발생하므로, 에코 페달이 필요 이상 작동하는 것을 방지하기 위해서 30 Km/h 이상의 속도에서만 에코페달이 작동하도록 설정하였다.

3. 에코 페달의 반력

에코페달의 반력은 운전자와 촉각적 인터페이스를 통해서 경제운전을 유도함이 목적이므로 운전자의 인지 여부가 우선적 이지만, 또 다른 측면에서 반력으로 인하여 운전자가 불쾌감을 느끼거나 반력의 작용으로 차량 제어에 부정적인 영향이 없어야 한다. 반력의 형태로서 진동형, 스텝형, 램프형을 고려하였는데, Fig. 4에는 페달에 작용하는 반력 토크(운전자의 관점에서는 반력으로 인지되지만 회전운동을 하는 페달의 관점에서는 반력 토크로 측정됨)의 형상과 이러한 반력이 페달에 가해지는 경우에 페달각-페달토크의 관계를 보여주고 있다. 진동형 반력은 진폭과 주파수, 지속시간이 설계변수가 되고, 스텝형 반력은 반력의 크기와 지속시간, 램프형 반력은 기울기와 지속시간이 설계변수가 된다.

반력에 따른 에코페달의 작동을 검증하기 위해서 Fig. 5와 같은 시험용 에코페달을 제작하였다. 시험용 페달은 페달과 연결된 선형 액추에이터에 의해서 스텝 토크나 램프 토크를 발생시킬 수 있고 또한 회전형 진동자에 의해서 원하는 진폭과 주파수의 진동형 반력을 생성할 수 있다.

세 가지 반력형태에 대해서 운전자의 반응에 대한 평가를 Fig. 5의 에코페달을 장착한 시뮬레이터를 이용하여 실시하였다. 차량을 직선주행로에서 일정하게 가속하여 허용가속도를 초과하도록 함으로써 에코 페달이 작동하도록 하였고 이

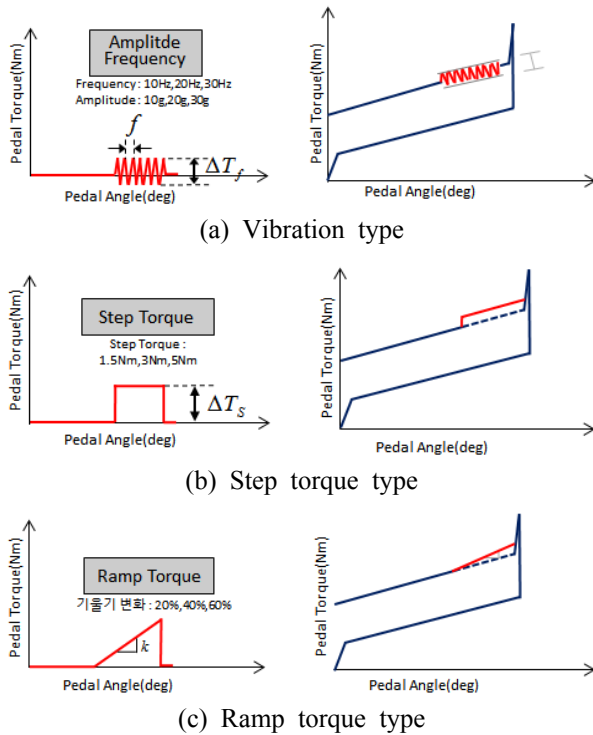


Fig. 4 Type of pedal reaction force and pedal angle-torque relation



Fig. 5 Eco-pedal reaction force generation test device

때 페달각, 페달 토크, 운전자 발목토크를 측정하였다.

스텝형 및 램프형 반력은 페달 강성을 현저히 변화시키는 특징이 있는데 이를 에코 페달에 적용하는 경우의 문제점은 반력 작용이 종료된 직후 페달 강성이 급격히 감소하게 될 때 운전자가 유지하고 있는 답력에 의해서 가속 페달에 오버슈트가 발생한다는 점이다. Fig. 6(a)에서는 5 Nm의 스텝반력이 종료된 후 약 5도의 페달각 오버슈트가 발생하며, Fig. 6(b)의 60% 기울기의 경사형 반력이 종료된 후에 약 2도의 오버슈트가 발

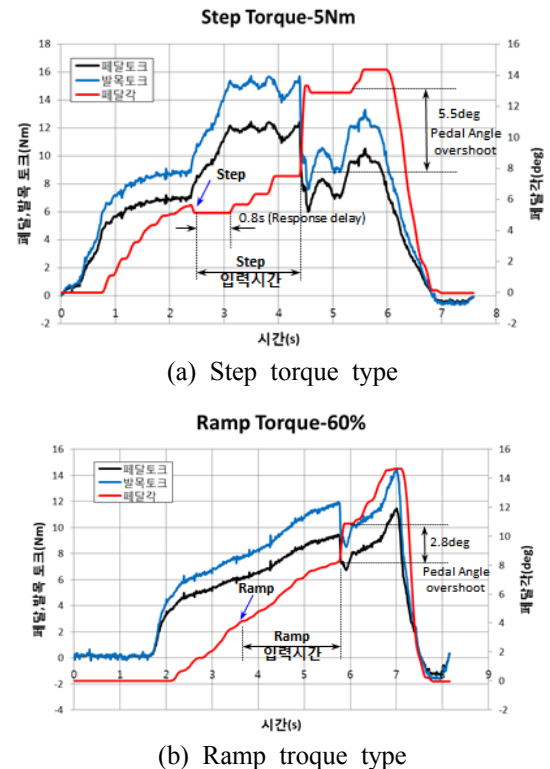


Fig. 6 Pedal torque, ankle torque, and pedal angle as function of time for step and ramp torque reaction force

생함을 보여준다. 또한 스텝형이나 램프형 반력을 적용하는 경우 전체적으로 페달의 회전강성(혹은 페달이 딱딱해짐)이 증가하여 위급상황에 실제로 가속을 해야 하는 경우 운전자가 순간적으로 페달을 제어하는데 어려움이 있다. 이러한 관점에서 페달 반력이 작용하더라도 페달토크 특성에 큰 영향을 주지 않는 진동형 반력이 적합한 것으로 평가되었다.

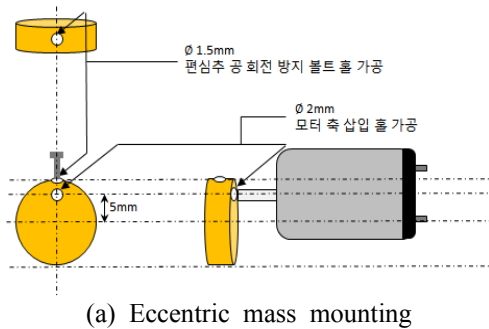
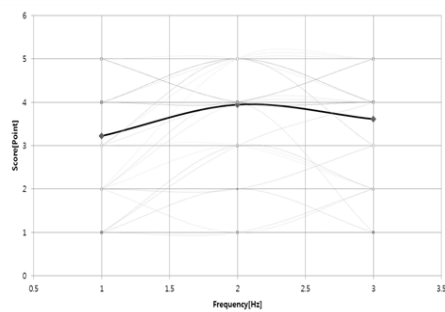
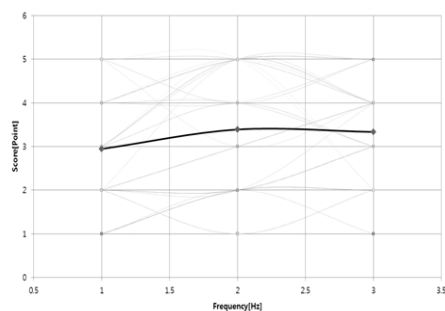
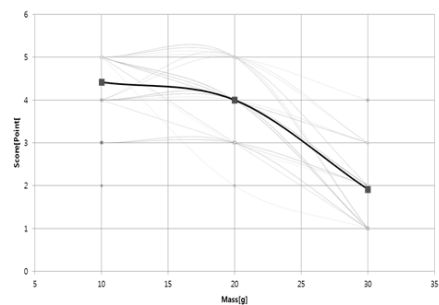
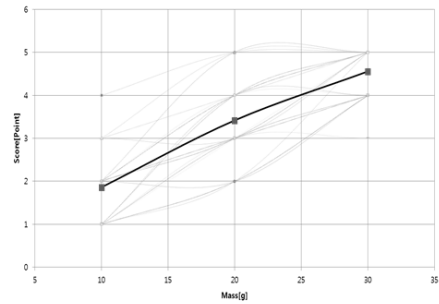
4. 진동형 반력 최적화

진동형 반력의 설계변수는 주파수, 진폭, 그리고 지속 시간인데, 이러한 설계변수는 연비 향상과 운전자의 인지도와 불쾌감 등의 주관적 요소를 고려하여 결정해야 한다.

진동의 주파수와 진폭을 변화시키기 위해서 Fig. 7과 같은 편심 회전 질량과 연결된 모터를 페달에 장착하였다. 회전 주파수는 10Hz, 20Hz, 30Hz이고 편심 회전 질량은 10g, 20g, 30g을 사용하였는데, 질량과 회전수에 따라서 페달에 작용하는 토크는 Table 1에 나타나 있다. 진동 지속 시간은 1초, 2초, 3초, 그리고 연속신호의 4가지

Table 1 Reaction torques for different eccentric mass and rotating speed

	10 Hz	20 Hz	30 Hz
10 g	0.133 Nm	0.3 Nm	0.356 Nm
20 g	0.266 Nm	0.595 Nm	0.71 Nm
30 g	0.4 Nm	0.9 Nm	1.07 Nm

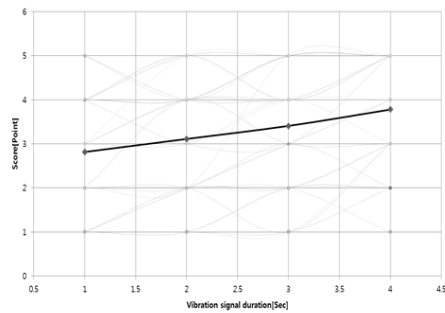

Fig. 7 Eccentrically mounted rotating mass with variable rotating speed

Fig. 8 Effect of frequency to perception and discomfort

Fig. 9 Effect of magnitude to perception and discomfort

를 선택하였다. 따라서 모두 $3 \times 3 \times 4 = 36$ 개의 시험 조건이 존재한다.

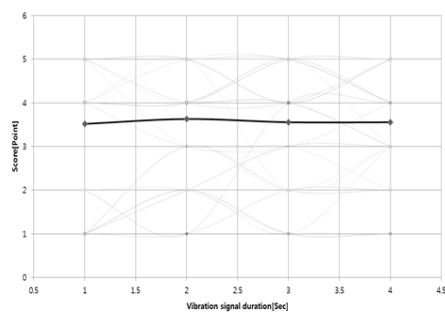
36가지의 진동 반력을 이용하여 피시험자가 느끼는 반력의 인지성과 불쾌감에 대해서 주관적인 평가를 실시하였다. 시험은 20대 남성 3인과 여성 3인을 대상으로 하였다. 인지성이란 신발을 신은 운전자가 페달에 가해지는 반력을 얼마나 잘 인지할 수 있는가를 의미하고, 불쾌감이란 운전자가 페달 반력에 대해서 느끼는 불쾌감의 정도를 의미한다. 인지성의 평가는 1점(인지성 낮음)~5점(인지성 높음)로 측정하였고, 불쾌감의 평가는 1점(불쾌감 높음)~5점(불쾌감 낮음)이다. 인지성과 불쾌감을 모두 합하여 가장 높은 점수가 최적의 반력이 된다.

주파수의 영향은 Fig. 9의 주파수의 함수로 표시한 인지성과 불쾌감의 주관적 평가점수 그래프에 나타나 있다. Fig. 9(a)의 인지성 평가에서는 주파수가 커질수록 인지성은 미세하게 증가하였고, 9(b)의 불쾌감의 경우, 주파수의 영향은 크지는 않았으나 20 Hz의 경우 가장 불쾌감이 낮았다.

Fig. 10은 진폭의 영향을 보여주고 있다. 진폭이 증가할수록 인지성과 불쾌감이 동시에 커짐을 알 수 있다. 실험에서 주의 질량이 작아 진폭이



(a) Perception to reaction torque



(b) Discomfort to reaction torque

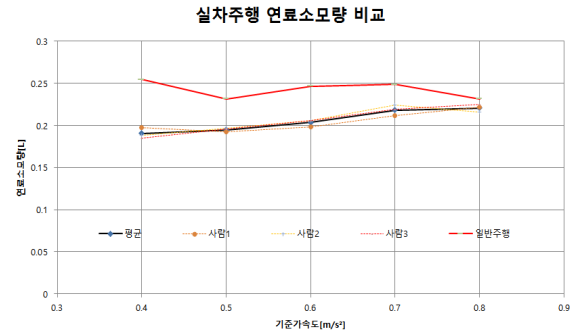
Fig. 10 Effect of time duration to perception and discomfort

작을 경우에는 차체의 진동과 신발로 인해 진동 반력을 잘 느끼지 못한다는 점을 피시험자가 보고하였다. 또한 진폭이 너무 큰 경우 운전자가 놀라는 경향이 있어 사고가 발생할 우려가 있다는 점을 보고하였다. 진동형 반력에서 진폭의 영향이 매우 중요함을 알 수 있다.

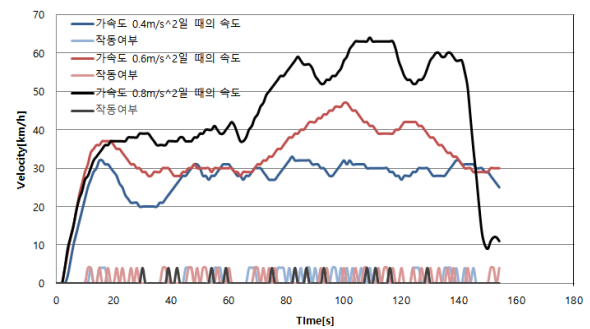
진동 신호의 지속 시간이 길어질수록 인지하는데 유리하였으며 지속시간은 불쾌감에는 큰 영향이 없음을 알 수 있었다(Fig. 10).

5. 주행시험을 통한 에코페달 효과 검증

에코 페달을 장착한 차량을 이용하여 두 가지 주행시험을 실시하였는데, 첫 번째 주행시험의 목적은 에코페달의 작동여부를 판단하는 허용가속도를 결정하기 위해서이다. 시험은 천안시 구성사거리에서 일봉사거리까지 약 3 Km의 거리를 실제 교통상황에 따라서 5-7분에 걸쳐 주행하였다. 허용가속도 $a=0.4 \text{ m/s}^2$, 0.5 m/s^2 , 0.8 m/s^2 , 0.7 m/s^2 , 0.8 m/s^2 로 설정한 에코페달을 장착하고 주행한 경우와 에코페달이 작동하지 않는 일반 주행을 3인의 운전자를 대상으로 실시하였다. 가능



(a) Fuel consumption



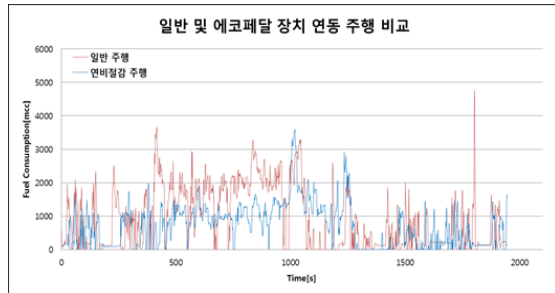
(b) Eco-pedal intervention

Fig. 11 Fuel consumption and intervention of eco-pedal for different allowable acceleration

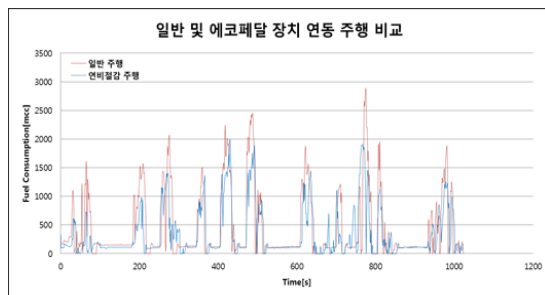
한 동일한 교통 환경을 유지하기 위해서 시험은 동일한 날짜에 오후 2-4시 사이에 한꺼번에 실시되었다.

Fig. 11(a)는 허용가속도의 함수로서 연료소비를 보여주고 있다. 허용가속도가 커질수록 연료소모가 증가하는 데, 이는 허용가속도가 작을수록 에코페달의 작동빈도가 커지기 때문이다. 에코페달을 사용한 경우 연비소모 평균값은 일반주행보다 약 15% 작음을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 허용가속도의 함수로서 표시한 주행속도를 보여주고 있다. 허용가속도가 작을수록 에코페달의 작동 횟수는 증가하고 결과적으로 차량의 주행속도는 감소하게 된다.

두 번째 주행시험은 시내와 고속도로의 두 가지 다른 교통 환경에서 비교적 장거리에 걸쳐서 에코페달의 유용성을 검증하였다. 고속도로 주행을 춘천시 강원대학교에서 홍천시외버스터미널까지 중앙고속도로를 경유하는 약 32.4 Km의 경로를 선택하였고, 시내도로 주행을 강원대학교에서 춘천 시내를 통과하여 소양강댐까지의 약 12.6 Km구간에서 실시하였다. 에코 페달의 작동을 최소화하기 위해서 허용가속도를 0.8 m/s^2 로 설정하



(a) High-way driving



(b) City driving

Fig. 12 Fuel consumption comparison

였다.

Fig. 12(a), (b)는 각각 고속도로와 시내도로 주행 시 연료소비량-시간 그래프의 일부를 보여준다. 에코페달이 적용된 경우의 연료소모량이 일반주행보다 더 낮음을 알 수 있는데, 고속도로 주행인 경우 약 13%, 일반도로 주행인 경우 약 15%의 연비절감을 달성하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 반력 생성형 에코 페달의 작동을 위한 제어로직, 반력 형태 분석 및 최적화, 실차 주행시험을 통한 에코 페달의 효용성 분석을 실시하여 에코 페달의 설계를 위한 이론적 근거를 제시하였다.

에코 페달의 작동 시점 결정을 위한 제어로직을 결정하기 위해서 운전자에게 허용되는 가속도인 “허용가속도”를 설정하고 현재의 주행속도에서 허용가속도로 가속할 때 요구되는 연료소비량을 계산하고 실제 연료소비량이 이 보다 더 많은 경우 에코 페달이 작동되는 제어로직을 제안하였다. 허용가속도는 낮을수록 에코 페달의 작동이 잦아지므로 연비절감 효과가 커지는 반면 잦은 작동으로 인하여 운전자에게 피로감을 유발할 수 있으므로 연비향상과 운전자 편의성을 모두 고려

하여 허용가속도를 결정해야 한다.

반력의 형태로는 스텝형, 램프형, 진동형을 고려하였으나 스텝형과 램프형은 페달 강성을 현저히 변화시켜 반력 종료 후 페달에 오버슈트가 발생하여 차량 속도제어에 부정적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 배제하였고, 기존 페달의 특성에 큰 영향을 주지 않는 진동형 반력이 가장 적절하였다. 시뮬레이터를 이용한 가속시험을 통하여 진동형 반력의 주파수와 진폭 그리고 지속시간의 영향을 평가하였고, 주파수나 지속시간 보다 반력의 크기가 운전자의 인지성과 불쾌감에 큰 영향을 미치는 요소임을 밝혔다.

고속도로와 시내구간 주행시험을 통해서 에코 페달의 연비향상 효과를 분석하였다. 허용가속도를 0.8m/s^2 로 설정한 경우 고속도로와 시내구간 주행에서 에코 페달을 사용하지 않은 주행과 비교하여 각각 13%와 15%의 연비절감 효과를 달성할 수 있음을 확인하였다.

후 기

2013년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(과제번호-120131262).

참고문헌 (References)

- (1) Shin, D. J., Yoon, H. J. Bae, H. C. and Song, K. K., 2009, "Development of Eco-drive Indicating System," *Proceedings of Korean Society of Automotive Engineers Annual Conference*, pp. 1780~1785.
- (2) Baek, Y. S., Jeon, N. J., Kim, J. H. and Lee, H. C., 2012, "A Study of Vehicle Control Algorithm for Fuel Economy on Roads with Up-Down Slope," *Proceedings of Korean Society of Automotive Engineers Annual Conference*, pp. 913~920.
- (3) Choi, S. C. and Lee, J. H., 2011, "Fuel Economy Improvement Cruise Control Algorithm Using Distance and Altitude Data of GPS in Expressway," *Transactions of the KSAE*, Vol. 19, No. 6, pp. 68~75.
- (4) Sakaguchi, S., Shiomi, M. and Oomori, M. 2010, "Development of Eco-drive Assistance System with Accelerator Pedal Additional Force," *Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol. 41, No. 6, pp. 1285~1290.
- (5) Fors, C., Kircher, K. and Ahlstrom, C., 2015,

"Interface Design of Eco-driving Support Systems-
Truck Drivers' Preferences and Behavioral
Compliance," *Transportation Research Part C:
Emerging Technologies*, Vol. 58, Part D, pp. 706~
720.

(6) Kim, Y. H., Sin, Y. G., Han, N. G. and Tak, T.
O., 2012, "Analysis and Design of the Active
Pedal for Improved Fuel Economy," *Proceedings
of Korean Society of Automotive Engineers Annual
Conference*, pp. 1020~1024.