

고도에 따른 제동 성능 예측을 위한 엔진 흡기압 모델링

안 광 만¹⁾ · 이 지 석¹⁾ · 박 진 일^{*2)} · 이 종 화²⁾

아주대학교 대학원 기계공학과 · 아주대학교 기계공학과

Modeling of Engine Intake Pressure for Predicting Braking Performance Affected by Altitude

Kwangman An¹⁾ · Jisuk Lee¹⁾ · Jinil Park^{*2)} · Jonghwa Lee²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, The Graduate School of Ajou University, Gyeonggi 442-749, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 442-749, Korea

(Received 31 October 2013 / Revised 24 January 2014 / Accepted 26 February 2014)

Abstract : Reduction of the atmospheric pressure in high altitude affects brake booster system which was operated by the difference between the intake pressure and the atmospheric pressure. So, braking system can not stably perform due to decrease of brake boost pressure. In this study, effects of altitude change on engine intake pressure was analyzed by prediction model of engine intake pressure which was studied previously. And engine intake pressure was simulated by simulation model in various driving conditions and environmental conditions.

Key words : Intake manifold pressure(흡기 매니폴드 압력), Brake boosting(제동 배력), Ambient pressure(대기압), Pumping loss(펌프 손실), Altitude(고도)

Nomenclature

P : pressure, kPa
V : volume, m³
τ : torque, Nm
m : mass, kg
T : temperature, °C
AF : A/F ratio

alt,l : alternator loss
accessory,l : accessory loss
d : displacement
i : indicated thermal
a : air

Subscripts

total,f : total friction
mech,f : mechanical friction
pump,l : pumping loss

1. 서론

제동 장치는 탑승자의 안전에 가장 중요한 역할을 담당하는 장치이다. 가솔린 차량의 경우 외부공기가 스로틀을 지나 흡입되면서 조성되는 부압을 이용하여 운전자가 브레이크에 전달하는 압력을 배력시켜 브레이크 패드에 전달하는 방식을 사용하고 있다. 차량 외부의 대기압과 스로틀을 지난 흡기압의 차이가 클수록 배력되는 힘도 커지기 때문에, 안정적인 제동 성능의 확보를 위해서는 흡기압과 대기압의 차이가 일정수준 이상으로 유지되는 것이

*A part of this paper was presented at the KSAE 2013 Annual Conference and Exhibition

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

중요하다.

흡기압은 엔진의 부하에 따라 결정되는데, 최근에는 연비 및 운전자의 편의와 안전을 위한 부대 장치들의 증가로 엔진의 부하가 증가하여 흡기압의 수준도 같이 증가하였다. 또한 강화되는 배기가스 및 연비 규제로 인해, 펌프 손실을 저감 시키고자 흡기압을 높게 제어하려고 하고 있다.

이와 같이 낮은 흡기압 확보가 어려워짐과 더불어 고도가 높은 곳에서의 낮은 대기압은 안정적인 제동성능의 확보를 힘들게 해 탑승자의 안전을 위협하고 운전자의 주행을 어렵게 만든다.¹⁾

따라서 제동장치를 제작함에 있어서 여러 운전 조건에서 흡기압이 얼마나 확보되는지 파악하고 이를 고려하여 브레이크 디스크에 충분한 힘이 전달 되도록 제동 배력 장치를 설계해야 할 필요성이 있다.

흡기압과 제동 성능이 얼마나 확보 되는지 파악하기 위해 제작사에서는 여러 운전 조건에서 실차 실험을 진행하고 있다. 외부 환경의 영향도 존재하기 때문에 환경 챔버에서 실험을 하거나 실험 조건에 맞는 지역에 가서 실험을 하기도 한다.

이러한 노력의 일환으로 흡기압의 예측을 통해 제동 배력 장치의 설계에 필요한 시간 및 비용을 단축하고자 하는 요구가 있다. 이러한 요구를 충족시키고자 제동 성능 예측을 위한 엔진 흡기압 모델링에 대해 연구하여 2012년에 발표하였고, 후속 연구로 본 연구를 진행하였다.²⁾

본 연구에서는 기 연구된 엔진 흡기압에 영향을 미치는 인자와 흡기압 예측 모델을 해발 고도 증가에 따른 대기압 감소에 대한 영향을 고려하여 확장시킨 연구이다. 이를 위해 기 연구된 엔진 흡기압에 관련된 영향인자와 모델을 이용하여 대기압 변화에 따른 관련 영향인자의 영향도를 분석하였다. 그리고 이를 모델에 적용하여 차량 정지 상태에서 다양한 고도 및 부하조건에 대하여 엔진 흡기압 시뮬레이션을 수행하고 이를 실측값과 비교하였다.

2. 실험 장치 구성 및 실차 실험

엔진 흡기압에 영향을 미치는 인자를 분석하고 이를 통하여 엔진 흡기압을 예측하기 위하여 Fig. 1과 같이 기본 예측 모델을 구성하고 이에 영향을 미

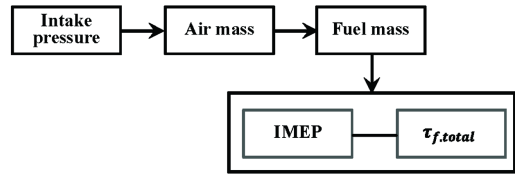


Fig. 1 Engine intake pressure model

칠 수 있는 영향 인자를 선정하였다.

Fig. 1은 엔진 흡기압 예측을 위한 과정을 간단하게 나타낸 것이다. 흡기압을 예측하기 위해서는 흡입공기량이 필요하다. 흡입공기량은 연료량과 공기-연료비로부터 간접적으로 추정할 수 있고 연료량은 도시열효율과 도시일로부터 결정된다. 이때 차량 정지 상태에서의 도시일은 차량의 총 마찰과 같다.

위의 기본 예측 모델의 각 요소에 영향을 미치는 인자는 엔진 총마찰, 도시열효율, Charge ratio, P_0 로 크게 구분하였고 이 중 엔진 총마찰은 도시일을 결정하는 요소이며 엔진 마찰, 펌프 손실, 알터네이터 손실, 보기 구동 손실로 나누었다.

이를 바탕으로 실험 대상차량의 고도 변화에 의한 외부압 변화 조건에서 영향 인자의 변화를 측정할 수 있도록 각종 센서를 설치 한 후 각 조건에서의 영향도 파악을 위한 실험을 진행하였다.

2.1 실험 장치 구성

본 연구에 사용한 차량은 1.6L급 가솔린 엔진을 탑재한 차량이다. 대상 차량에 인자별 데이터 측정을 위한 센서를 설치하였다.

차량 총 마찰을 구하기 위하여 연소압 센서를 통하여 엔진의 도시일을 취득하였다.

AF analyzer를 이용하여 공기-연료비를 취득하고 차량 각 부의 정보와 ECU 정보를 담은 데이터 버스가 송수신되는 Controller Area Network (이하 CAN)를 통해 ECU로부터 취득한 연료량 자료를 통하여 흡입 공기량을 추정하였다.

영향 인자의 변화를 측정하기 위해 Rotary Encoder를 통하여 엔진 속도를 취득하고 Alternator 발전량 측정을 위하여 전류센서를 설치하였다. 온도센서 설치를 통하여 엔진 오일 온도, 외기 온도 등을 취득하였다.

엔진 흡기압과 냉각수 온도, 변속기 오일 온도,

Spark timing 등은 차량의 CAN 통신을 통해 ECU로부터 취득하였다.

2.2 실험 방법

영향 인자들이 엔진 흡기압에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 각 영향 인자를 독립적으로 변경하는 실험을 통하여 각 인자들이 변할 때 엔진 흡기압의 변화를 측정하여 이를 분석해야 한다.

실차 실험 시에는 독립적으로 제어할 수 있는 영향 인자가 적기 때문에 D단 차량 정지 상태에서 엔진 Warm up 실험, 엔진 속도 변동 실험, 엔진 부하 변동 실험의 결과값을 통하여 상온, 상압에서 각 영향 인자를 분석하고 이를 통하여 엔진 흡기압 모델을 구성하였다.

위에서 분석한 상온, 상압에서의 영향인자와 모델을 기본으로 환경 챔버에서 고도에 따른 외부압을 모사하여 각 상황에서 영향 인자의 변동을 측정하였다.

환경 챔버에서의 실험은 정상상태에 이른 차량을 정지 상태에서 엔진 부하를 증가시키면서 진행하였다.

3. 인자별 영향도 분석

본 연구에서는 차량 운전 상태에 따른 도시일을 계산하고 이를 도시열효율을 이용하여 연료량으로 환산한 후 측정된 공기-연료비를 통해 흡입 공기량을 추정한다.

위에서 추정된 흡입 공기량과 이상 기체 방정식을 사용하여 최종적으로 식 (1)과 같은 흡기압 예측 모델을 구성하였다.

$$P_{intake} = \frac{(\tau_{total,f} \times AF) \times R \times T}{r_{ch} \times V_d \times \eta_i} + P_0 \quad (1)$$

where R : gas constant
AF : A/F ratio
rch : Charge ratio

구성된 모델의 주요 요소는 엔진 총 마찰, 도시열 효율, 이상 기체 방정식과 흡기압의 관계를 통하여 식 (2)과 같이 정의한 Charge ratio, 배기과정에서 연소실 체적에 남게 되는 연소 가스에 의한 영향을 고려한 변수 P_0 이다.

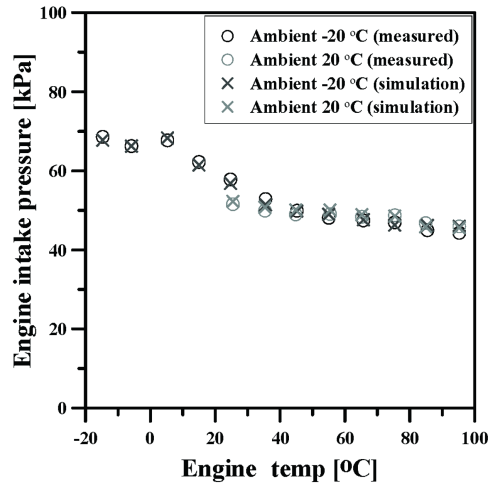


Fig. 2 Result of prediction of engine intake pressure

$$r_{ch} = \frac{m_a \times R \times T}{(P - P_0) \times V_d} \quad (2)$$

각 요소는 엔진 온도, 엔진 속도, 엔진 부하, 외부 조건 등을 고려하여 모델링되었고 위의 모델을 통하여 예측한 각 운전 조건에 따른 흡기압이 동일 조건에서 실측한 흡기압과 2kPa이내의 차이를 보였다.

Fig. 2는 엔진 온도, 외기온도 조건 변경에 따른 모델 예측값과 차량에 측정된 실제 흡기압을 비교하여 모델을 검증한 그래프이다. 실측 흡기압과 5%이내의 오차로 흡기압을 예측하였다.

위의 모델과 차량 실험을 통해 고도 변화에 따른 외기압 변화에 영향을 받는 요소를 분석하였다. 주요 요소 중 외기압에 영향을 받는 인자는 엔진 총 마찰에 영향을 미치는 펌프 손실, 이상 기체 방정식을 통하여 예측한 흡기압과 실제 엔진 흡기압과의 관계를 보정해주는 변수인 P_0 로 구분할 수 있다.²⁾

3.1 펌프 손실의 영향

엔진 흡기압 예측 모델의 주요 요소 중에 차량 정지 상태에서의 엔진 총 마찰은 다음 식 (3)과 같이 엔진 마찰, 펌프 손실, 알터네이터 손실, 보기 구동 손실로 나눌 수 있다.³⁾

$$\tau_{total,f} = \tau_{mech,f} + \tau_{pump,l} + \tau_{Alt,l} + \tau_{Accessory,l} \quad (3)$$

상압 실험 데이터와 고지대의 대기 조건을 모사한 챔버에서의 부하변경 실험 데이터를 비교해 보

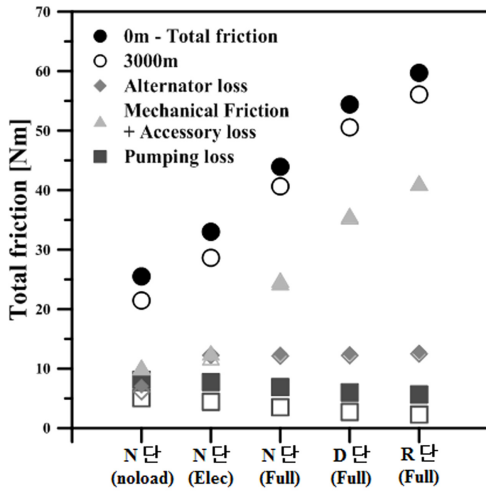


Fig. 3 Altitude effects on total friction

면 Fig. 3과 같이 엔진 마찰, 알터네이터 손실, 보기 구동 손실은 고도 변화에 따른 외부압 변화에 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다.

위의 3가지 인자는 기계적, 전기적 손실이기 때문에 외부압 변화에 따른 영향을 받지 않는다.

반면에 펌프 손실은 흡/배기과정에서 발생하는 압력차이로 인하여 발생하는 손실이기 때문에 고도 변화에 따른 외부압 변화에 영향을 받는다.⁴⁾

엔진의 배기 행정 이 끝날 무렵의 흡기 행정초기의 실린더 압력은 대기압과 거의 평형을 이루거나 조금 크게 된다. 그리고 펌프 손실을 제외한 다른 손실들이 같다면 이때 발생하는 동력이 같다고 가정할 수 있고 흡기압도 같다고 가정할 수 있다.⁵⁾

위의 상황에서 고도 증가로 인하여 외부압이 저지대에서의 대기압에 비해 감소하게 되면 엔진의 흡기 행정 초기의 실린더 압력은 감소한 외부압 만큼 감소하게 된다.

발생되는 동력이 같다고 가정하면 흡기압이 같다고 가정할 수 있기 때문에 흡/배기 행정 시 발생하는 압력 차이는 대기압의 감소로 인한 배기압의 감소로 인해 감소하게 되고 이는 펌프 손실의 감소를 의미한다.

실제로는 이렇게 펌프 손실이 감소하여 엔진 총 마찰은 더욱 감소하게 되고 이는 흡기압의 감소를 의미한다. 때문에 흡/배기행정에서의 흡기압과 배기압력 차이는 더 감소하고 이로 인해 펌프 손실도

감소하게 된다.

정리하면 고도가 증가하면 외부압은 감소하고 이로 인해 펌프 손실은 감소한다. 펌프 손실의 감소로 엔진 총 마찰은 감소하고 흡기압도 감소한다.

3.2 P₀의 영향

정의된 P₀는 엔진 배기 행정 말기에 연소실 체적에 남아 있는 연소가스가 흡기과정에서 팽창되어서 형성될 수 있는 압력을 의미하며 배기압과 압축비에 영향을 받는다.

배기 행정 말기의 실린더 내에는 연소실 체적만큼의 연소 가스가 남아 있고 때문에 흡기과정에서 실린더 내부의 압력은 절대압으로 0kPa이 되지 않는다. 이로 인해 연소가 가능한 공기를 흡입하기 위해서는 흡기압이 남아있는 연소 가스로 인해 생성될 수 있는 압력보다 더 커야한다.

이를 고려하여 예측된 흡기량으로 부터 구한 흡기압에 연소 가스로 인하여 형성될 수 있는 압력을 더해 주어야 한다.

이를 P₀라고 정의하였고 P₀는 압축비와 대기압에 관계가 있다. 대기압이 감소할수록 연소실 체적에 남아있는 연소가스의 압력은 감소하고 이로 인해 P₀도 감소하게 되며 압축비가 높을수록 행정체적 대비 연소실 체적이 작아지기 때문에 연소실에 남아있는 연소가스가 흡기 행정 중에 팽창하게 되는 비율이 커지고 이로 인해 형성될 수 있는 압력이 감소하게 되고 P₀는 감소하게 된다.

정리하면 고도가 증가하면 대기압이 감소하기 때문에 P₀도 감소하게 된다. P₀는 연료량을 통하여 예측된 흡기압에 더해지는 양이기 때문에 흡기압 또한 감소하게 된다.

고도에 따라 정의된 P₀를 모델의 주요 인자인 도시열효율과 Charge ratio를 통하여 검증했다. 구성된 모델인 식 (1)에서 상수인 R, T, V_d 등은 고도에 영향을 받지 않는 상수로 가정하고 제외하면 주요 인자인 엔진 총 마찰과 도시열효율, Charge ratio가 남게 된다.

이때 엔진 총 마찰의 경우에는 3.1절에서 고도에 따른 영향이 있는 것으로 분석하였고 나머지 두 인자인 도시열효율과 Charge ratio가 고도에 따른 영향

을 받지 않는다면 두 인자의 곱인 흡기압과 연료량과의 관계는 고도에 상관없이 거의 일정한 값을 보여야 한다.

Fig. 4는 상압에서 도출한 P_0 를 각 고도에 그대로 적용하여 위의 관계를 구한 것이다. 고도 3000m와 상압을 비교해보면 최대 0.035, 평균 0.022의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 각 고도에서의 표준대기압과 압축비를 통하여 고도별로 도출한 P_0 를 이용해 위의 관계를 구한 것이다. Fig. 4에 비하여 고도에 의한 차이가 줄

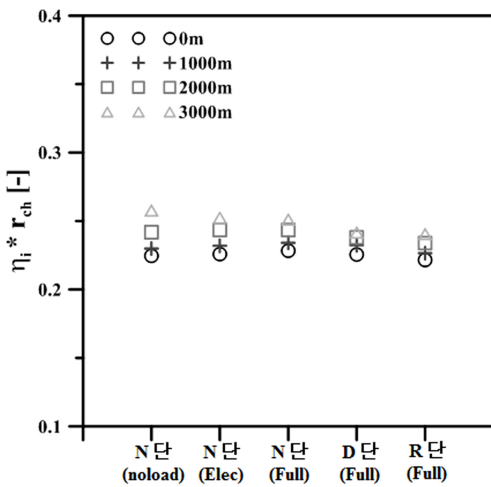


Fig. 4 Altitude effect on indicated thermal efficiency * Charge ratio (uncorrected)

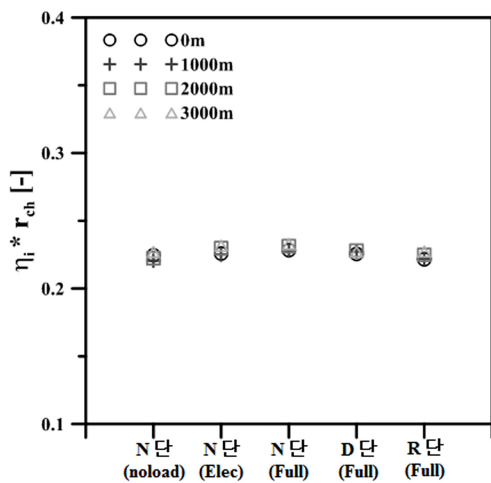


Fig. 5 Altitude effect on indicated thermal efficiency * Charge ratio (corrected)

어드는 것을 볼 수 있다. 동일한 고도 3000m 기준으로 상압과 비교하여 보았을 때 평균 0.004의 오차로 P_0 보정 후에 고도에 상관없이 거의 일정한 값을 보였다.

4. 엔진 흡기압 시뮬레이션

상압에서 도출한 흡기압 예측모델에 두 인자에 대한 영향을 추가하여 예측 모델을 확장하였다.

상압에서 도출한 흡기압 모델을 고지 조건에 적용할 경우 Fig. 6과 같이 차이가 발생하고 두 인자에 대하여 보정을 할 경우 측정된 흡기압과의 차이가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

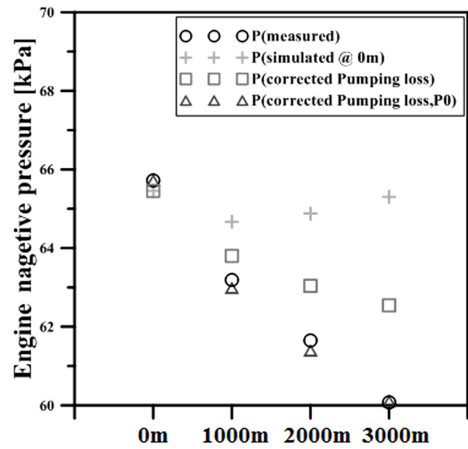


Fig. 6 Prediction of engine intake pressure

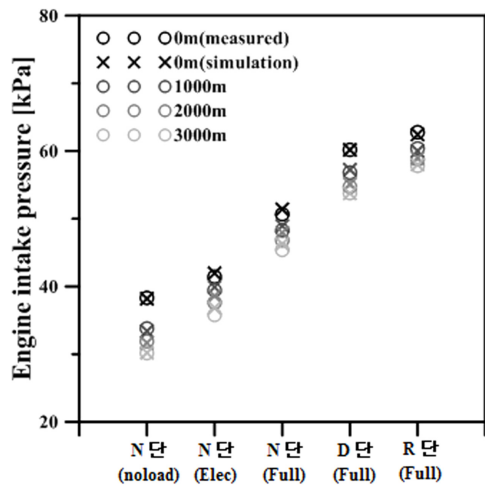


Fig. 7 Result of prediction of engine intake pressure (1.6L)

위의 결과를 통해 확장된 예측 모델을 통하여 예측한 값과 실차 실험을 통하여 측정된 고도 변화에 따른 흡기압을 비교하면 다음과 같다.

Fig. 7은 1.6리터급 가솔린엔진을 탑재한 차량의 예측 결과이고 최대 오차 1.1kPa, 평균 오차 0.5kPa로 측정된 흡기압을 잘 예측하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 1.0리터급 가솔린엔진을 탑재한 차량에 예측 모델을 적용해본 결과이고 최대 오차 1.8kPa, 평균 오차 0.7kPa로 흡기압을 예측하였다.

Fig. 9는 2.0리터급 가솔린엔진을 탑재한 차량에 예측 모델을 적용해본 결과이고 최대 오차 1.6kPa, 평균 오차 0.9kPa로 흡기압을 예측하였다.

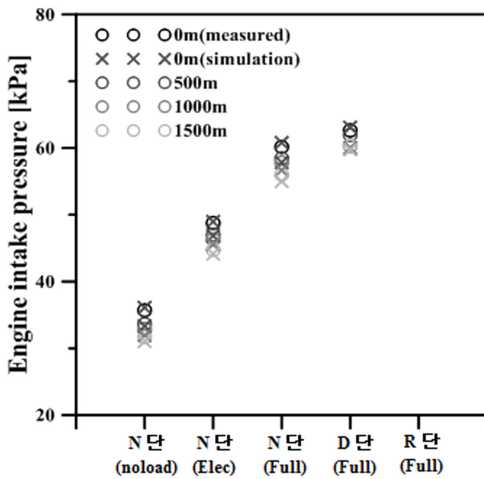


Fig. 8 Result of prediction of engine intake pressure (1.0L)

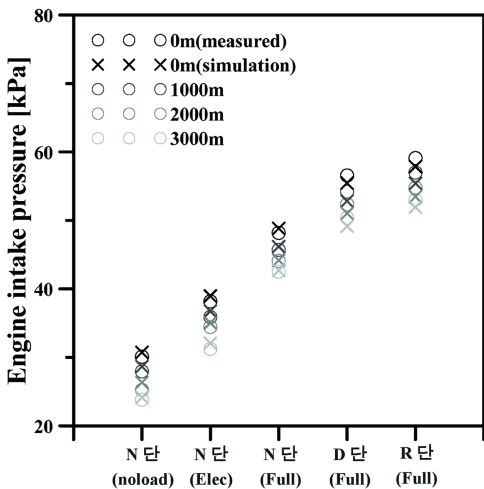


Fig. 9 Result of prediction of engine intake pressure (2.0L)

5. 결론

본 연구에서는 엔진 흡기압에 영향을 미치는 인자 중에 대기압에 영향을 받는 인자인 펌프 손실과 P_0 의 영향을 분석하고 이를 기존에 연구된 모델에 적용하였다.

펌프 손실과 P_0 의 영향을 고려한 예측 모델을 통해 예측한 엔진 흡기압과 실차 실험에서 측정된 흡기압을 비교하였고 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 엔진 흡기압에 영향을 미치는 인자 중 펌프 손실과 P_0 는 배기압에 영향을 받는 인자이고 배기압은 대기압과 관계가 있기 때문에 위의 두 인자는 대기압에 영향을 받는다.
- 2) 기 연구된 예측 모델에 고도에 따른 영향을 고려하여 모델을 보정한 결과 고도 3000m 기준으로 평균 6kPa의 오차를 보이던 기존 모델 대비 66% 감소한 2kPa이내의 오차를 보였다.
- 3) 예측 모델을 통하여 각 환경 조건, 운전 조건에 따른 흡기압을 예측하였고 이를 차량 실험을 통하여 측정된 실제 흡기압과 비교한 결과 최대 오차 2kPa이내의 정확도로 흡기압을 예측하였다.

References

- 1) J. H. Kim, Y. D. Kim and M. K. Jung, "A Study to Improve Brake Pedal Feel under Low Booster Vacuum Level," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1379-1383, 2010.
- 2) J. H. Choi, K. M. An, J. S. Lee, J. I. Park and J. H. Lee "Modeling of Engine Intake Pressure for Prediction of Brake Performance," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.167-170, 2012.
- 3) H. B. Song, Modeling and Experiments for the Break-down of Fuel Consumption in a Passenger Car, Ph. D. Dissertation, Ajou University, Gyeonggi, Korea, 2002.
- 4) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill, New York, 1988.
- 5) K. S. Park, S. K. Kaoh, S. T. Ro and J. H. Lee, "An Experimental Study of the Air Flow Rate Characteristics at Steady State in an SI Engine," Transactions of KSAE, Vol.5, No.6, pp.1-12, 1997.