

다이내모 기반의 차량 제동력 검사장비 개발 연구

임진우* · 이광희* · 김부현** · 이철희*

Research on Development of Dynamo based Vehicle Brake force Inspection Equipment

Jinwoo Lim*, Kwang-Hee Lee*, John Kim**, Chul-Hee Lee*

Key Words : Brake force(제동력), Dynamo(다이내모), Roll and brake tester(롤 제동력 검사장비), Friction force(마찰력), vehicle(자동차)

ABSTRACT

Dynamo based vehicle inspection device is end of line device for automobile industry. The device is utilized as implementing vehicle functionality inspection such as brake force, cruise control, kick-down acceleration, CAN inspection. As dynamo based inspection device is broadly adopted in automobile industry, the dynamic study is required to verify the vehicle test equipment reliability. This research recommends appropriate dynamic brake force inspection procedure and theoretical background for developed equipment. Dynamic characteristic of brake force implementation to roller is simplified. With simplified characteristics, the indirect brake force measurement strategy is developed and adopted. Comparison of each brake force result, the appropriate brake force inspection criterion is given.

1. 서론

2004년 이후 제동장치 결함으로 인한 고속도로 교통사고는 전체 차량결함요인으로 인한 원인 중 15%에 달하는 높은 비율을 보인다.⁽¹⁾ 이처럼 자동차의 성능에 있어 제동성능은 탑승자의 안전을 결정하는 중요한 성능이다. 이에 따라 최근 제동력을 결정하는 브레이크 및 그 페달특성에 한 연구가 다수 진행되어왔다.

4륜 자동차의 제동력 검사기준⁽²⁾이 개발되는 한편 이륜자동차의 각 바퀴당 제동력 효율에 근거한 제동력 검사기준에 관한 연구가 진행되었다.⁽³⁾ 또한, 비상제동 시스템,⁽⁴⁾ 브레이크 디스크 표면 특성,⁽⁵⁾ 제동력 예측 프로그램 개발,⁽⁶⁾ 답력 특성에 따른 브레이크 페달 분

석⁽⁷⁾ 등이 다양하게 연구되었다.

또한, 차량의 주행에 있어 제동력이 직접 지면에 전달되는 힘을 정확히 구하기 위한 연구 또한 다수 진행되었다. 그러나 기존의 제동력 검사장비에 관한 연구는 실제 차량의 고속주행을 고려하지 못한 차량 정지 상태 또는 준 정지상태의 제동력측정에 관한 연구만이 진행되었다⁽⁸⁻¹⁰⁾. 다이내모기반의 제동력 검사장비는 자동차 산업 생산라인의 마지막단계(End Of Line)에 사용되는 장비로써, 실제 자동차 운행을 모사하여 크루즈 컨트롤, 킥다운 가속, ESC점검, 통신점검 등을 동시에 진행할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 다이내모장비가 실제 산업에서 활용되는 모습은 쉽게 확인될 수 있으나, 이에 대한 검증연구는 많은 진행이 이루어지지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 차량의 고속주행을 모사하여 제동력을 검출하는 다이내모기반 제동력 검사장비의 타당성 및 적합 검사방법이 연구되었다.

* 인하대학교 기계공학과

** (주)한국이야사까 기기공업

E-mail : chulhee@inha.ac.kr

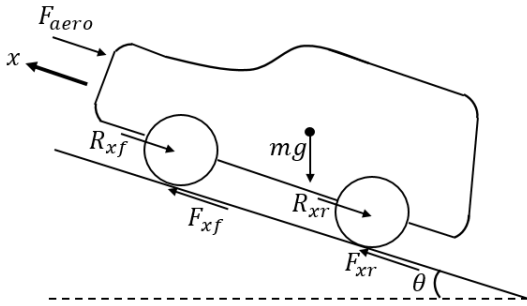


Fig. 1 Longitudinal vehicle dynamics

2. 제동력 이론

2.1. 종단 차량 동역학

차량 주행에 있어 종단면에서 발생하는 외력은 Fig. 1과 같이 나타난다. 외력의 종류는 공기저항, 중력, 타이어 외력, 구름저항 등으로 간소화 할 수 있다. 종단면에서 차량의 주행방향을 x 라고 했을 때, 차량의 힘 평형은 다음 식(1)과 같다.

$$m\ddot{x} = F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xf} - R_{xr} - mg\sin\theta \quad (1)$$

여기서, 차량이 받는 외력은 차량의 운동방향을 양의 방향을 기준으로 표현이 가능하다. F_{xf}, F_{xr} 은 각각 앞, 뒤 타이어가 받는 힘, F_{aero} 는 공기저항, mg 는 중력, R_{xf}, R_{xr} 은 구름저항을 나타낸다. 본 연구에서는 차량이 수평 다이노미위에 탑재된 상태로 진행되었으므로, 차량동력이 없는 상태에서의 외력은 다음 식(2)과 같이 간소화 된다.

$$F_{xf} + F_{xr} = R_{xf} + R_{xr} \quad (2)$$

즉 차량이 받는 외력은 타이어가 받는 마찰력과 구름저항 뿐이며 그 크기는 동일하다. 따라서 다이노미위의 차체가 정지된 상태에서 고려해야할 외력은 타이어가 받는 마찰력과 타이어 회전운동에 따른 구름저항 뿐이다. 이에 따라 본 연구에서 사용한 제동력의 정의는 다음과 같이 정리될 수 있다.

차량의 바퀴가 받는 외력은 다음과 같이 제동력으로 정리된다. Fig. 2에 제시된 바와 같이 바퀴가 굴러가기 위한 토크 T_1 이 있는 경우, 이는 바닥과 접지면에서 발

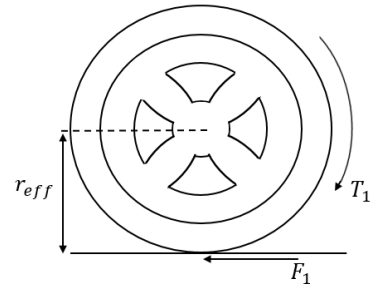


Fig. 2 External force to tire

생하는 힘 F_1 과 유효반지름 r_{eff} 사이의 곱으로 나타낼 수 있다. 이때, 이 운동의 반대방향 제동 토크가 존재하며 바퀴를 굴리기 위한 토크가 없다면 제동력은 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{brake} = \frac{T_{brake}}{r_{eff}} \quad (3)$$

2.2. 롤러와 제동력의 관계

다이노미 롤러 위의 차량 바퀴가 받는 제동력은 두 물체 사이에 슬립이 없다는 가정과 함께 나타낼 수 있다. 차량이 롤러와 접촉한 상태로 등속운동을 할 경우, 바퀴로 전달되는 동력은 두 회전체를 구동하기 위한 구름저항과 같다. 다음 Fig. 3에서 차량 구동계, 접촉에 의한 감속 가속도는 α_2 , 롤러 회전체 체결 부의 구름저항으로 인한 감속 가속도는 α_1 으로 나타내었다.

두 회전체의 접촉운동에 슬립이 없다고 가정한다면, 바퀴와 롤러의 속도관계는 다음 식(4)와 같다.

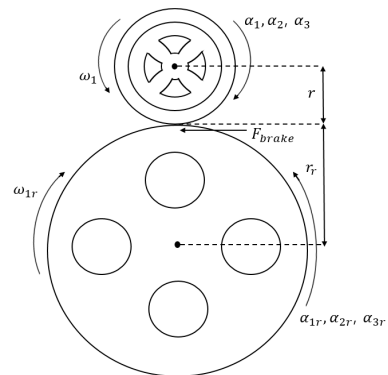


Fig. 3 Schematic relation between roller and tire

$$\omega_1 = \frac{r}{r_r} \omega_{1r} \quad (4)$$

이때, 등속운동을 유지하기 위한 차량의 동력은 두 회전체에 관여하는 구름저항이, 체결 부 저항의 합과 동일하다. 차량의 동력전달이 중지되면 롤러 체결부 저항으로 인한 감속 가속도 α_1 과 차량 체결 부, 구름저항으로 인한 감속 가속도 α_2 의 영향이 나타나게 된다. 이때 바퀴에 전달되는 저항력은 롤러에도 동일하게 적용되며, 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{I_r}{r_r} (\alpha_{1r} + \alpha_{2r}) \quad (5)$$

체결 부 저항 및 구름저항으로 감속이 진행되는 중, 차량에서 브레이크작동으로 인한 외력이 바퀴에 전달된다면 브레이크로 인한 감속 가속도 α_3 이 나타나게 된다. 이때, 바퀴가 받는 외력은 다음 식 (6)과 같다.

$$F = \frac{I_r}{r_r} (\alpha_{1r} + \alpha_{2r} + \alpha_{3r}) \quad (6)$$

$$F_{brake} = \frac{I_r}{r_r} (\alpha_{2r} + \alpha_{3r}) \quad (7)$$

식 (6)을 바탕으로 바퀴에 전달되는 외력을 롤러감속 가속도 측정을 통하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 실제 차량 주행에 있어 차량이 받는 저항인 α_2, α_3 만을 제동력(7)으로 고려하였다.

3. 실험 방법 및 절차

3.1. 롤러 손실 측정

롤러의 저항은 기본적으로 운동 반대 방향으로의 저항을 가지며, 이는 베어링마찰, 모터 벨트저항 등 여러 가지 요인들에 의해 발생한다. 롤러의 저항은 제동력 F_{brake} 와 마찬가지로 표면 접선방향의 힘으로 표현할 수 있으며 이를 ‘롤러 자연 손실(Roller natural loss)’로 표기한다.

본 연구에서 사용한 계측장비로는 엔코더와 로드셀이 있으며 각 롤러에 엔코더가 설치되어있다. 롤러 자연 손실은 롤러 속도가 120km/h 까지 증속된 후, 모터 동력을 끊어 자연스럽게 감속될 때의 가속도를 측정하

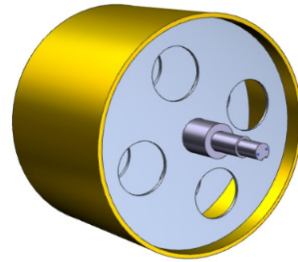


Fig. 4 Dynamo roller

여 구한다.

3.2. 롤러 관성 보정

식 (7)에 명시되어 있듯이 F_{brake} 를 구하기 위해서는 롤러의 관성모멘트(I_r)가 필요하다. 정확한 제동력을 검출하기 위해서는 정확한 관성모멘트가 필요하다. 따라서 이론적으로 계산된 관성모멘트 이외에 보정 과정을 통하여 실제로 적용되는 관성모멘트를 구한다. 이때 사용되는 교정기는 Fig. 5에 지시되어 있듯이 다이노모 롤러를 수직으로 눌러주며, 수직력은 공압실린더와 레플레이터를 이용하여 일정한 값이 유지되도록 설계하였다.

보정과정에서는 롤러 표면에 마찰 재를 접촉시켰을 때 로드셀에 표시되는 마찰력과 엔코더 측정을 통해 계산된 $\frac{I_r}{r_r} \alpha$ 값을 비교하여 편차를 구한다. 이때, 정확한 값의 비교를 위해 로드셀을 통해 표시되는 마찰력이 3% 이내의 오차범위 내에 있는 값만을 비교하였다.

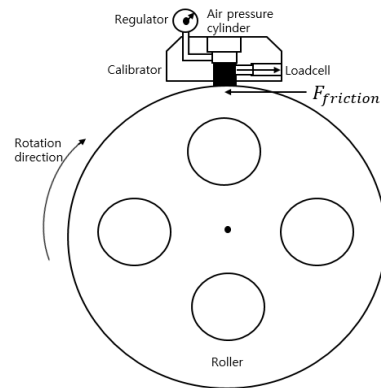


Fig. 5 Calibrator implementation to roller

3.3 제동력 측정

제동력 측정 및 계산은 롤러와 바퀴 사이에 슬립은 없으며, 외력으로 표면 접선방향의 힘만이 가해진다는 두 가지 가정을 바탕으로 한다. 앞선 관성 보정 및 손실 측정과 마찬가지로 엔코더를 통해 측정되는 롤러의 각속도 변화량을 통해 제동력을 계산한다.

본 연구를 통해 측정하고자 하는 제동력은 ABS 제동을 고려하지 않은 일반 제동이다. 측정에 앞서 ECU에 ABS 동작 정지 명령을 주어 일반 제동만이 작동하도록 설정하였으며, 일정 시간이 지난 이후에 ABS가 작동되도록 하였다. 또한 제동력 측정과정에서 샘플링 주기는 50 ms로 설정하였다.

4. 실험 측정 및 결과

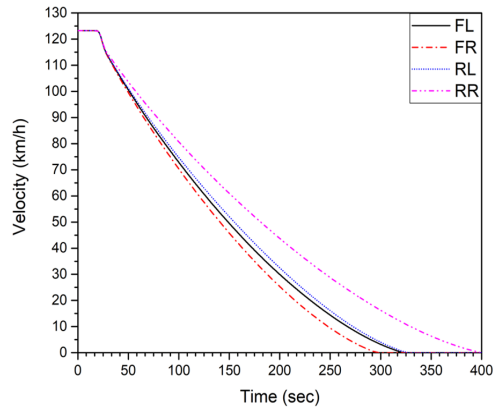
4.1. 롤러 자연 손실

롤러의 자연손실은 120 km/h 부근의 속도에서 정속 주행 후 모터동력을 정지시켜 감속될 때의 제동력과 같은 방향의 힘을 의미한다. 각각 롤러의 위치는 전륜 좌측(Front Left, FL), 전륜 우측(Front Right, FR), 후륜 좌측(Rear Left, RL), 후륜 우측(Rear Right, RR)으로 구분되었으며, Fig. 6 (a)는 시간에 따른 각각 롤러의 속도, (b)는 롤러 속도에 따른 롤러 자연손실을 보인다. 롤러 자연손실의 크기는 롤러의 속도에 따라 다르며, 롤러 자연손실과 롤러 속도는 비례관계에 있음을 알 수 있다. 따라서 식 (6)에서 명시되어 있는 바와 같이 α_1 을 빼주기 위해서 Fig. 6 (b) 데이터는 일차방정식 형태로 제동력에 적용되었다.

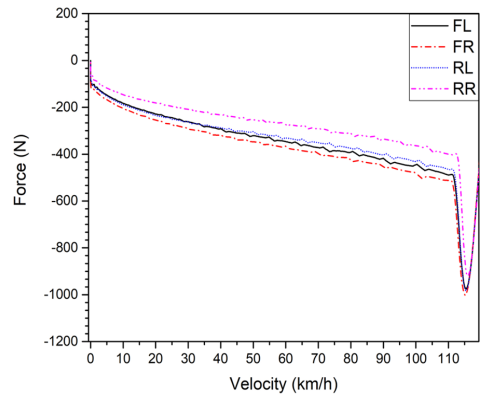
$$M_{roller} = \frac{F_{roller2} - F_{roller1}}{RPM_{roller2} - RPM_{roller1}} \quad (8)$$

$$B_{roller} = F_{roller1} - (M_{roller} \times RPM_{roller1}) \quad (9)$$

일차방정식을 정의하기위해 식 (8), (9)를 이용하여 기울기와 절편이 이용되었다. 식 (8)에서 M 은 방정식의 기울기이며 식 (9)에서의 B 는 절편을 의미한다. 이때, F_{roller} , RPM_{roller} 는 각각 롤러 접선방향의 힘과 롤러의 rpm을 나타낸다. 방정식에서 $roller2, roller1$ 은 50 ms의 시간차를 갖는다. 기울기와 절편은 각각의 롤러에 적용되어 제동력계산에 이용되었다.



(a)



(b)

Fig. 6 (a) Time-velocity and (b) velocity-force relation during natural roller deceleration

4.2. 롤러 관성 보정

롤러의 관성 보정은 로드셀 데이터와 롤러 감속 가속도데이터 통해 계산한 마찰력의 비교를 통하여 이루어진다. 실험에서 사용된 교정기의 마찰력은 수직 하중이 일정하게 적용되더라도 Fig. 7과 같이 일정한 값을 나타내지 않아 롤러 감속 가속도의 안정을 판단하는 기준이 요구되었다. 롤러 감속 가속도 데이터의 안정은 가속도를 미분한 jerk가 사용되었으며, 일정 범위 이내의 값을 보일 경우 롤러 감속으로 계산된 마찰력과 로드셀 마찰력의 편차가 계산되도록 하였다. Fig. 8은 교정기의 마찰력데이터를 나타내며, 편차 계산 시 대푯값으로는 마찰력데이터의 이전 값과의 오차가 3 % 이내에 해당하는 값을 설정하였다.

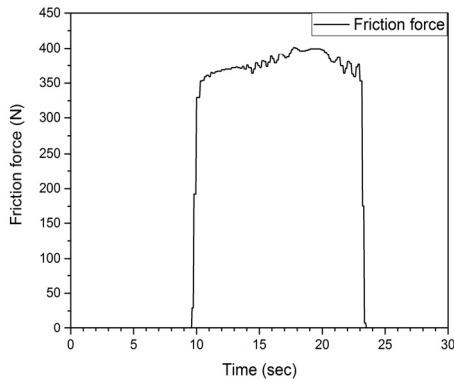


Fig. 7 Calibrator friction force



Fig. 8 Vehicle on Roll and Brake tester

4.3. 제동력 측정

차량은 123 km/h에서 정속주행을 거쳐 Fig. 9와 같이 제동력 검사에 돌입하게 된다. Fig. 9의 4 구간은 각각 정속주행, 드래그, 일반제동, ABS 제동을 나타낸다. 드래그는 차량 변속을 주행 단계에 유지시켜놓음으로써 엔진브레이크의 영향 또는 브레이크 오작동 및 체결 정확성을 확인하게 된다. 드래그 구간 이후 일반제동에서

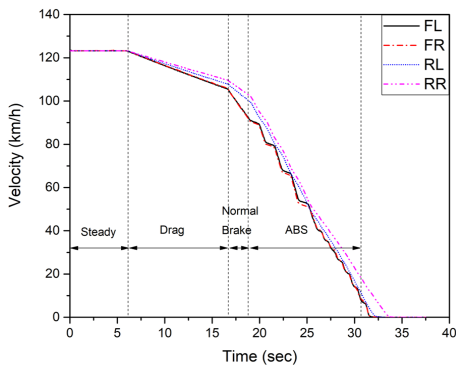


Fig. 9 Experiment vehicle velocity distribution

Table 1 Brake force exerted to each roller

Left wheel	Force(N)	Right wheel	Force(N)	Deviation(%)
FL	786.86	FR	769.98	2.14
RL	428.69	RR	421.44	1.69

는 차량 탑승자가 페달을 답력계 지시에 맞춰 차량에 일정한 제동력을 가하게 된다. 이때 Fig. 9에 나타나 있듯이, 드래그 구간과 기울기 차이를 통해 차량에 제동이 적용되었음을 확인할 수 있다.

본 실험을 통해 일정한 답력으로 제동력을 가했을 때의 값은 Table.1 과 같다. 전륜이 후륜에 비해 큰 제동력 값을 보였으며 제동력의 좌우 편차는 2% 내외로 나타났다.

일반제동 이후 차량은 ABS 제동에 돌입하게 된다. 일반제동의 검출이 거시적 가속도 계산을 통해 이루어 졌다면, ABS 제동의 검출은 실시간 가속도 변화의 확인을 통해 그 기능의 검증이 진행되었다.

또한, 식 (7)에서의 두 회전체 사이에 슬립이 없다는 가정은 CAN data로부터의 차륜 속도데이터와 롤러 속도데이터의 비교를 통해 타당성이 검증되었다. CAN data 기준 차륜의 속도는 전륜구동 차량 기준으로 전륜의 속도를 나타내기에 Fig. 10에서 Front Left wheel 과 속도를 비교하였다. 또한 본 과정에서는 ABS 기능이 해제된 상태에서 일정시간동안 브레이크 페달을 밟아 속도 비교 측정이 진행되었다. Fig. 10의 (a)는 시간에 따른 제동력의 크기를 나타낸다. 동일한 시간에서 Fig. 10 (b)와 (c)는 각각 두 속도데이터의 비교와 속도데이터 오차를 나타낸다. Fig. 10 (b)의 데이터로부터, Fig. 10 (c)의 각 샘플링 시간에 따른 에러를 나타내었다. 차륜과 롤러 사이의 속도는 제동이 가해질 경우 모두 일정한 감속 가속도도로 감속하며, 두 속도 데이터의 오차는 1.5 % 이내의 경향을 보여 식(7)에서의 가정이 타당함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 차량 고속주행 상황에서의 다이내모 기반 제동력 검출장비의 타당성 및 적합검사방법이 연구되었다. 다이내모에서의 제동력은 로드셀이나 토크 센서가 아닌 접촉 롤러의 감속 가속도 측정을 통해 간접적으로 측정이 가능하도록 설계되었다. 롤러와 바퀴

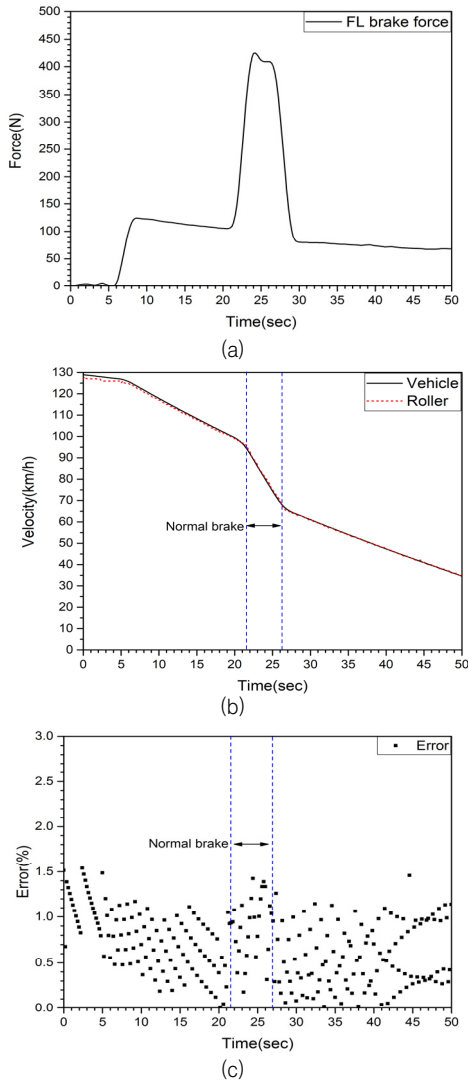


Fig. 10 (a) FL brake force distribution and (b) velocity difference between roller and vehicle with (c) error

사이의 상대운동을 표현하기 위해, 제동력이 가해질 경우, 슬립이 없다는 가정이 전제되었고, 이는 제동력 시험에서 두 회전체의 표면속도차가 1.5 % 이내에 해당하는 오차를 보며 가정이 타당함을 보였다.

연구과정에 있어 수학적으로 계산된 관성모멘트는 직접적으로 측정된 마찰력과 감속 가속도로 계산된 마찰력을 비교해 실제 관성모멘트가 제동력 측정에 적용 되도록 하였다. 또한, 이 관성 보정 작업에서 일정 데이

터를 취득하는 판단 기준을 적용하여 마찰력이 안정화 되어 있을 때 데이터가 취득되도록 하였다.

실험에서 일정 브레이크 페달에 일정 답력이 가해졌을 때, 전륜과 후륜은 제동력의 크기가 큰 차이를 보였으며, 좌우편차는 2 % 이내의 값을 나타내었다.

참고문헌

- (1) 교통안전공단, 2011, “자동차검사 불합격과 교통사고 발생 간 상관관계 연구”
- (2) ISO 28580
- (3) 임재문, 홍승준, 하태웅, 2016, “이륜자동차 제동장치 검사기준에 관한 연구,” 한국자동차안전학회 논문집, 제8권, 제4호, pp. 18~23.
- (4) 김태우, 이경수, 최인성, 민경찬, 2015, “자동차비상제동 시스템의 안전성평가,” 한국자동차안전학회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 25~31.
- (5) 한진, 김윤, 이학인, 이정주, 2015, “브레이크 디스크의 산질화처리가 부식지연 제동특성에 미치는 영향에 관한 연구,” 한국자동차안전학회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 19~24.
- (6) C.-H. LEE, J.-M. LEE, M.-S. CHOI, C.-K. KIM, E.-B. KOH, 2011, “Development of a semi-empirical program for predicting the braking performance of a passenger vehicle,” International Journal of Automotive Technology, Vol. 12, No. 2, pp. 193~198.
- (7) 김기태, 심재경, 2012, “답력을 고려한 조절식 브레이크 페달 분석,” 한국자동차공학회 학술대회 및 전시회, pp.1956~1961.
- (8) 오상엽, 2015, “운행 자동차에 대한 정적 및 동적 제동력 검사 시스템의 제동력 특성 비교,” 한국자동차공학회 논문집, 제23권, 제3호, pp.344~351.
- (9) 여운석, 박원덕, 정영달, 강병도, 2012, “운행자동차의 동적 제동력 검사장비 도입에 관한 연구,” 한국자동차공학회 추계 학술대회 및 전시회.
- (10) Senabre C, Valero S, Velasco E, 2015, “Comparative analysis of various brake testers used in ministry of transport facilities, such as: bank of roller testers and dynamometris platform testers,” Adv Automob Eng, Vol 4, Issue 2.