

브레이크 압력 추정을 적용한 구동력 제어 Traction Control with Brake Pressure Estimation

김세윤^{1*}

S. Y. Kim

Received: 9 May 2013, Revised: 10 Jul. 2013, Accepted: 10 Jul. 2013

Key Words : Traction Control(구동력 제어), Pressure Estimation(압력 추정), Pulse Width Modulation(펄스폭 변조), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어)

Abstract: Traction control suppresses the spinning of the driven wheel during drive away or acceleration on slippery road condition. In this study, the estimation method of brake pressure hardly measured is proposed. The estimation method of brake pressure and the brake pressure control with pulse width modulation(PWM) are verified a good performance through experiment. Also, the vehicle simulation on slippery road conditions is validated the applicability of brake pressure control for traction control. The simulation results have showed that the brake pressure can be used the control variable for traction control.

기호 설명

- F_{xDi} : traction force
- F_r : rolling resistance force
- I_w : inertia moment of wheel
- P_B : brake pressure
- r_w : radius of tire
- R_f : gear ratio of differential gear system
- T_D : driving torque
- V_v : vehicle velocity
- λ : slip rate
- ω : wheel speed

1. 서론

자동차의 안전성 향상과 고급화라는 소비자의 욕구에 부응하고 외부 환경적인 요소들로부터 운행 중 차량의 안정성을 능동적으로 확보하기 위한 기술들이 개발되고 있다. 그 대표적인 것으로 제동시 차륜의 록업(lock up)을 방지하는 ABS(Anti-lock Braking System)과 가속시 차륜의 스핀(spin)을 방지하는 TCS (Traction Control System) 그리고 차량에 요모멘트(yaw moment)를 발생시켜 차량의 거동을 제어하는 VDC(Vehicle Dynamic Control) 등이 있다. 이 기술들은 제어 대상인 차량의 속도와 구동륜 속도를 차륜 속도 감지기로부터 정보를 입수하여 슬립율(slip rate)을 계산하고 슬립율이 적절한 목표 값을 추종할 수 있도록 제어한다.^{1~4)}

슬립율은 차륜에 전달되는 과도한 구동 토크를 제어하여 조절하는데 일반적으로 엔진 출력 토크 제어와 브레이크 압력 제어를 수행한다. 엔진 출력 토크 제어 방식은 스로틀 밸브의 개도, 점화 시기 및 연료 분사시기 등을 제어하여 엔진의 출력 토크를 조절하는데 차량의 운행 전 영역에 걸쳐 작동할 수 있고 승차감 변화에 영향을 적게 미치는 반면 엔진의 시간

* Corresponding author: seiyoong@wnu.ac.kr
 1 Department of Automotive Engineering, Gangneung-Wonju National University, Wonju 220-711, Korea
 Copyright © 2013, KSFC
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지연 및 관성 등에 의해 응답성이 낮다. 브레이크 압력 제어 방식은 엔진 출력 토크 제어 방식에 비하여 응답성이 양호하고 미세한 제어가 가능하며 좌우 차륜의 노면 조건이 다른 경우에 각각의 차륜을 독립적으로 제어를 수행할 수 있어 양 차륜의 상태를 균형 있게 유지하고 이를 통해 차량의 주행 안정성을 확보할 수 있다.⁵⁾

현재 양산되는 차량에서는 브레이크 압력을 측정할 수 있는 감지기가 부착되어 있지 않기 때문에 차륜의 슬립율과 가속도의 상태를 근거로 차륜의 슬립율이 기준 영역 내에서 유지될 수 있도록 브레이크 압력의 형성 기울기를 결정하는 것이 일반적이다. 이러한 방식은 차륜이 놓인 외부 환경 상황에 따라 형성되어야 할 브레이크 압력의 기울기를 시뮬레이션 및 실험적 경험과 시행착오에 의한 노력에 의해 결정해야 한다.⁶⁾

본 논문에서는 슬립율 제어를 수행하기 위하여 브레이크 압력을 직접 제어하는 알고리즘을 구성하였다. 변조율(duty rate)의 변화에 따른 브레이크 압력 특성 실험을 수행하여 브레이크 시스템의 동특성을 분석하였고 솔레노이드 밸브의 구동신호와 작동시간의 정보로부터 브레이크 압력을 추정하는 방법을 제안하였다. 추정된 브레이크 압력은 브레이크 압력 제어에 이용하였다. 제안한 브레이크 압력 제어가 차량 구동력 제어의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 슬라이딩 모드(sliding mode) 이론을 적용한 차량 제어에 브레이크 압력 제어를 접목시켜 차량 적용성을 고찰하였다. 차량 제어기를 통해 차륜의 슬립율이 목표 슬립율을 추종되도록 차륜의 목표 토크를 결정하고 이에 해당하는 브레이크 압력으로 변환하여 브레이크 압력 제어의 기준 입력으로 제공하고 이를 추종하게 하였다.

2. 브레이크 압력 제어

2.1 브레이크 압력 추정

일정한 주파수와 크기를 갖는 반송파 신호와 입력 신호를 비교하여 펄스폭을 변조시키는 펄스폭 변조(PWM : Pulse Width Modulation) 방법을 사용하여 브레이크 압력 제어를 수행함에 있어 브레이크 압력의 정보가 필수적이다. 제어기로부터 출력되는 구동 신호로 솔레노이드 밸브의 상태를 결정할 수 있으며 작동 시간에 의해 브레이크 압력의 크기가 결정되는데 착안하여 실질적으로 감지가 어려운 브레이크 압력을 추정하였다.

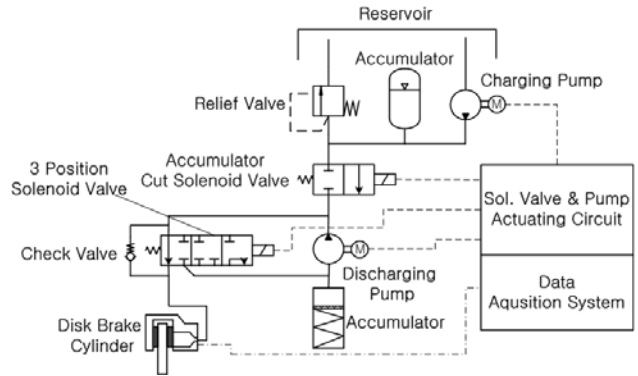


Fig. 1 Hydraulic circuit of traction control

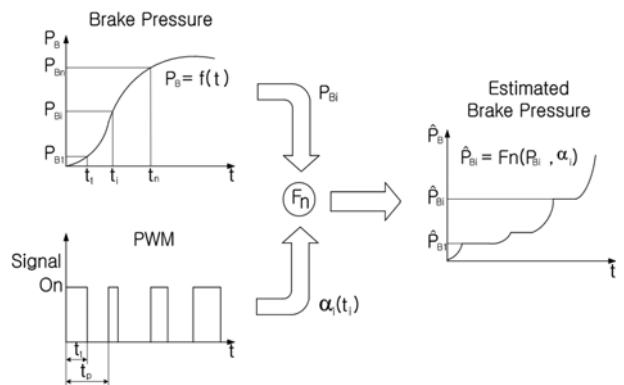


Fig. 2 Estimation method of brake pressure

솔레노이드 밸브의 작동시간에 의한 브레이크 압력의 변화를 고찰하기 위하여 Fig.1과 같이 실험 장치를 구성하였고 변조율 변화에 따른 브레이크 압력 형성 실험을 수행하여 브레이크 시스템의 동특성을 구하였다. 솔레노이드 밸브의 작동 주파수를 변화시키면서 변조율을 0~100%로 변경하였을 때 증압 단계와 감압 단계에서의 시상수를 구하였고 변조율이 30%이상에서는 실험한 모든 주파수에서 시상수 값이 거의 비슷함을 알 수 있었다. 이로부터 솔레노이드 밸브를 제어하는데 사용되는 변조율의 범위를 선정할 수 있었다.

증압 단계 또는 감압 단계에서 솔레노이드 밸브를 일정한 변조율을 갖는 맥동형 신호로 작동시켜 브레이크 압력 형성의 실험 자료를 얻었다. 펄스폭 변조 방법에서 구동 신호는 변조율이 변화하는 맥동형 펄스들의 조합이라고 간주할 수 있어 맥동형 신호를 선정하였다. 이들 실험 자료로부터 브레이크 압력을 추정하는데 기본이 되는 실험식과 필요한 실험적인 인자 α_t 를 구하였다. 제어기의 구동신호로부터 솔레노이드 밸브의 작동 시간 t_t 와 작동 상태가 결정되면 실험식

을 통해 작동시간에 해당하는 압력 P_{Bi} 와 실험적 인자 α_i 를 요소로 하는 함수식(1)로부터 추정된 브레이크 압력 \widehat{P}_{Bi} 을 구하였다. Fig.2는 실험에서 얻은 자료와 솔레노이드 밸브의 작동과의 상호 관계로부터 브레이크 압력을 추정하는 방법을 도식적으로 나타낸 것이다.

$$\widehat{P}_{Bi} = F_n(P_{Bi}, \alpha_i) \quad (1)$$

앞에서 제시한 브레이크 압력의 추정 방법의 신뢰성을 확인하기 위하여 맥동형 신호의 변조율을 시간에 따라 변화시켜 실험을 수행하였고 그 결과를 Fig.3에 나타냈다. 변조율은 시간에 따라 증압시 7.5%, 22.5%, 15%로, 감압시에는 12.5%, 25%로 선정하였다. 변조율의 크기가 변화하는 경계점 그리고 솔레노이드 밸브의 작동 상태가 변화하는 부근에서 다소 오차가 있으나 이러한 오차의 크기는 10%이내에 존재하고 있으므로 추정 방법으로 브레이크 압력을 추정할 수 있음을 확인하였다.

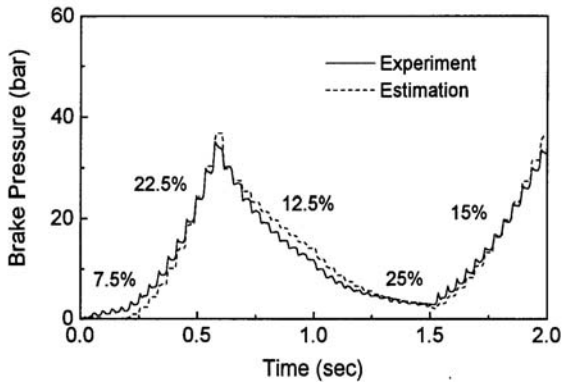


Fig. 3 Comparison of estimated brake pressure with measured one

2.2 브레이크 압력 제어

주어진 기준 입력을 추종하도록 PI제어기와 펄스폭 변조 방법을 이용하여 브레이크 압력 제어를 수행하였다. 추정방법으로부터 얻은 브레이크 압력과 기준 입력을 비교하여 PI 제어기 입력으로 사용하였고 PI 제어기의 출력을 펄스폭 변조 방법의 입력 신호로 활용하였다. PI 제어기를 펄스폭 변조 방법 앞에 설치한 이유는 펄스폭 변조 방법만으로 제어하였을 때 작동 시간이 작은 변조율 영역에서 솔레노이드 밸브가 작동되지 않음으로 인하여 발생하는 응답 지연을 보상하기 위함이다.

진폭의 크기가 20bar이고 3Hz의 주파수를 갖는 기

준 입력을 추종하는 브레이크 압력 제어를 수행하여 Fig.4에 나타냈다. 기준 입력을 부드럽게 추종하지는 못하지만 전반적인 압력 형성은 기준 입력을 중심으로 형성되고 있음을 알 수 있어 주어진 입력을 추종하도록 차량의 브레이크 압력을 조정할 수 있음을 알 수 있었다.

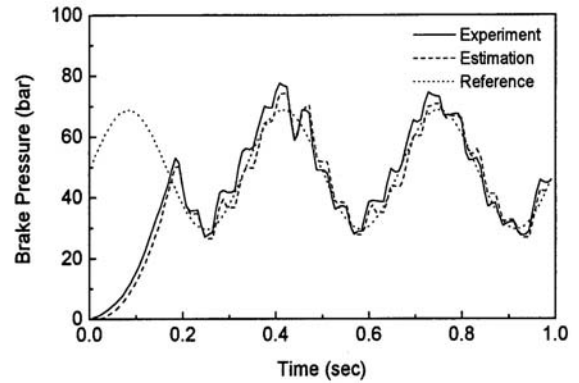


Fig. 4 Tracking response of brake system with PWM for reference input of 3Hz sine wave

3. 브레이크 압력 제어를 적용한 구동력 제어

3.1 시뮬레이션을 위한 구성 요소

제한한 브레이크 압력 제어가 구동력 제어의 성능에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 고찰하기 위하여 차량 시스템을 모델링하였고 그 요소들의 상호 연결에 관한 관계도를 Fig.5에 나타냈다. 제어기에서 계산된 엔진의 목표 출력 토크, 솔레노이드 밸브의 구동 신호 그리고 주어진 경로 등이 입력으로 각 요소들에 전달된다. 구동력 제어의 성능을 분석하는데 요구되는 특성만을 나타내는 엔진 모델을 실험 자료에 의해 수립하였고 트로틀 밸브의 개도에 따른 엔진의 출력 토크를 구하여 차량 시스템에 작용시켰다. ABS/TCS 모듈레이터의 구성 부품들을 모델링하여 솔레노이드 밸브의 구동 신호에 의해 차량에 형성되는 브레이크 압력을 구하였고 차량의 제동 토크로 작용시켰다. 차량이 주어진 경로를 추종하도록 조향각을 결정하는 운전자 모델도 수립하였다. 차량의 운동 방정식은 7자유도 모델로 나타내었고 가속도에 의해 발생하는 각 차량의 수직 하중의 변화와 슬립각을 구하는 수학적 모델을 수립하였다. 실험 자료를 근거로 타이어의 특성을 나타내는 타이어 모델을 이용하여 차량의 거동에 미치는 차량의 구동력(longitudinal force)과 횡력(lateral force)을 구하였다.

3.2 직진하는 경우의 차량 제어 알고리즘

운전자가 조향을 수행하지 않는 직진 가속시에는 차량의 횡속도와 차륜의 슬립각이 작게 발생해 무시한다고 가정하면 차량의 운동 방정식은 다음과 같이 단순화시킬 수 있다.

$$\dot{\omega}_1 = (T_{f1}I_{fc} - T_{f2}I_f)/I_v \tag{2}$$

$$\dot{\omega}_2 = (T_{f2}I_{fc} - T_{f1}I_f)/I_v \tag{3}$$

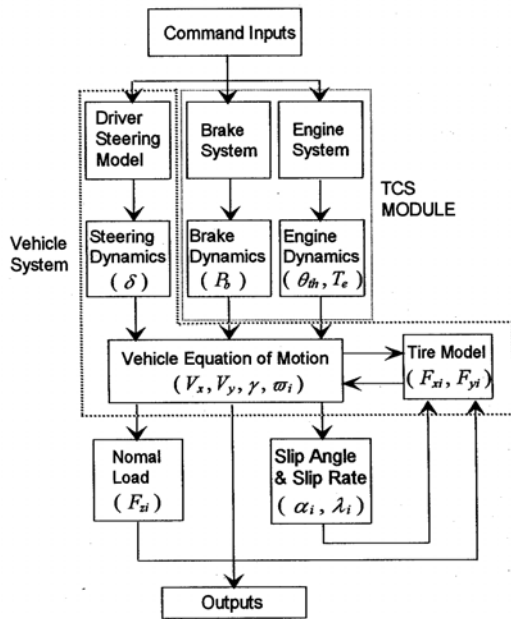


Fig. 5 Relational diagram of component module for simulation

$$\dot{V}_v = \frac{1}{m_v}(F_{xD1} + F_{xD2} - F_r) \tag{4}$$

여기서

$$T_{f1} = T_1 - F_{xD1}r_w - T_{r1}$$

$$T_{f2} = T_2 - F_{xD2}r_w - T_{r2}$$

$$T_1 = (1 - \lambda_{D1})T_D \frac{R_f}{2} - T_{B1}$$

$$T_2 = (1 - \lambda_{D2})T_D \frac{R_f}{2} - T_{B2}$$

$$F_r = F_{xD3} + F_{xD4} + F_{ax}$$

$$I_v = I_{fc}^2 - I_f^2$$

$$I_{fc} = I_w + \frac{1}{4}I_D R_f^2, \quad I_f = \frac{1}{4}I_D R_f^2$$

직진 가속시 구동력의 계수가 최대가 되는 슬립율을 목표 슬립율로 선정하고 스위칭 평면을 구성하는 상태를 슬립율 오차 $\tilde{\lambda}_i = \lambda_i - \lambda_{pi}$ 로 선택하여 슬라이딩 평면을 식(5), (6)와 같이 선정하였다.

$$S_i = \tilde{\lambda}_i = \frac{r_w \omega_i - V_v}{r_w \omega_i} - \lambda_{pi} \tag{5}$$

$$\frac{dS_i}{dt} = \frac{1}{r_w \omega_i} [r_w (1 - \lambda_i) \dot{\omega}_i - \dot{V}_v] \tag{6}$$

차동장치로 연결되어 서로 커플링 되어 있는 구동륜을 독립적으로 제어하기 위해 슬라이딩 조건을 만족하는 제어 입력을 구하면 다음과 같다.

$$T_1 = T_{eq1} - K_1 \text{sgn}(S_1) \tag{7}$$

$$T_2 = T_{eq2} - K_2 \text{sgn}(S_2) \tag{8}$$

여기서

$$T_{eq1} = F_{xD1}r_w + T_{r1} + [A_1(\lambda_1)I_{fc} + A_2(\lambda_2)I_f]/I_v$$

$$T_{eq2} = F_{xD2}r_w + T_{r2} + [A_1(\lambda_1)I_f + A_2(\lambda_2)I_{fc}]/I_v$$

$$A_1(\lambda_1) = \frac{I_v}{r_w m_v (1 - \lambda_1)} (F_{xD1} + F_{xD2} - F_r)$$

$$A_2(\lambda_2) = \frac{I_v}{r_w m_v (1 - \lambda_2)} (F_{xD1} + F_{xD2} - F_r)$$

$$K_1 \text{sgn}(S_1) = \left[\frac{I_f \omega_1}{(1 - \lambda_1)} \eta_1 \text{sgn}(S_1) + \frac{I_f \omega_2}{(1 - \lambda_2)} \eta_2 \text{sgn}(S_2) \right]$$

$$K_2 \text{sgn}(S_2) = \left[\frac{I_f \omega_1}{(1 - \lambda_1)} \eta_1 \text{sgn}(S_1) + \frac{I_f \omega_2}{(1 - \lambda_2)} \eta_2 \text{sgn}(S_2) \right]$$

3.3 차량 구동력 제어

브레이크 제어의 차량 적용성을 고찰하기 위하여 저마찰 노면을 갖는 평지인 도로와 경사도로에서 발진 상황을 고찰하였다.

얼음 노면과 유사한 저마찰(low- μ)의 도로 노면에서 발진 가속시 브레이크 압력 제어를 수행하지 않았을 경우의 차량 응답 특성을 Fig.6에 나타냈다. 엔진으로부터 공급되는 토크가 구동륜을 가속시키는데 사용되므로 구동륜의 속도(wheel velocity)가 목표 속도(reference velocity)를 벗어나 계속 증가하고 슬립율의 증가를 유발시킨다. 이로 인하여 차륜에서 작용하는 구동력과 횡력은 점점 작아져 차량의 가속성과 조종 안정성이 상실되는 상태가 될 수 있다.

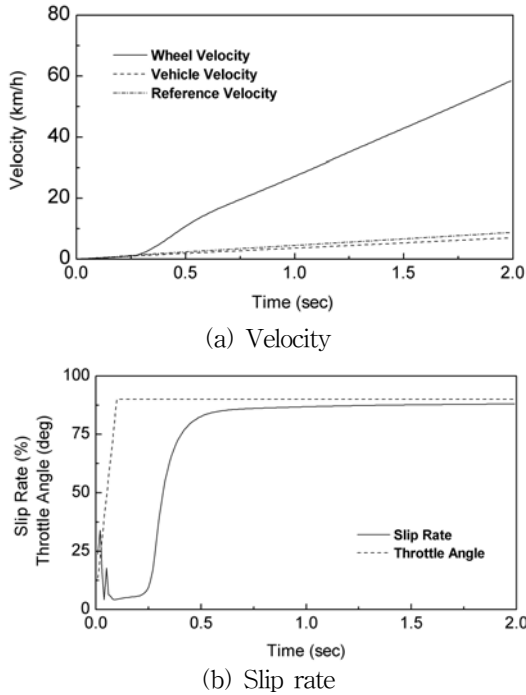


Fig. 6 Vehicle response under low- μ road condition without brake pressure control

Fig.7은 Fig.6과 같은 조건 하에서 브레이크 압력 제어를 수행하여 얻은 차량 응답이다. 그림에서 알 수 있듯이 구동륜의 슬립율이 기준 슬립율을 벗어나는 과도한 슬립이 발생하면 이를 감지하여 기준 슬립율을 내로 들어오도록 한다. Fig.6와 비교하여 보면 구동륜의 속도가 제어 초기에 기준 속도를 크게 벗어나는 것을 브레이크 압력을 형성하여 막을 수 있었고 구동륜의 속도가 기준 속도를 빠르게 추종하고 있음을 보여주고 있다. 또한 구동륜의 슬립율을 기준 슬립율로 유지할 수 있어 차량의 가속성과 조종 안정성이 향상될 수 있음을 예측할 수 있다.

다져진 눈 정도의 마찰계수와 10%의 경사를 갖는 노면에서 발진 가속시 브레이크 압력 제어를 수행하지 않은 차량 응답을 Fig.8에 나타냈다. 차량의 전반적인 응답 특성은 저마찰 평지 노면에서 발진하는 경우와 유사하나 차량의 하중이 뒤로 작용하여 발생하는 저항 때문에 차량의 가속성이 현저히 떨어지고 있음을 알 수 있었다. Fig.9는 브레이크 압력 제어를 수행한 차량 응답으로 제동압력이 형성되어 구동륜의 슬립을 제어함으로써 목표 속도를 구동륜이 추종하고 있음을 보여주고 있다. 차량의 출발 가속성도 제어를 수행하지 않았을 경우보다 60%정도 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 브레이크 압력이 크게 작용하는 제어 초기에는 차동장치의 영향으로 차륜 속도의 변

화가 상호 심해져 슬립율의 변화가 많이 나타나고 있으나 속도가 증가함에 따라 낮은 압력 변화로 차륜의 속도를 기준 속도에 접근 시킬 수 있기 때문에 슬립율의 변화가 줄어들고 있음을 알 수 있었다.

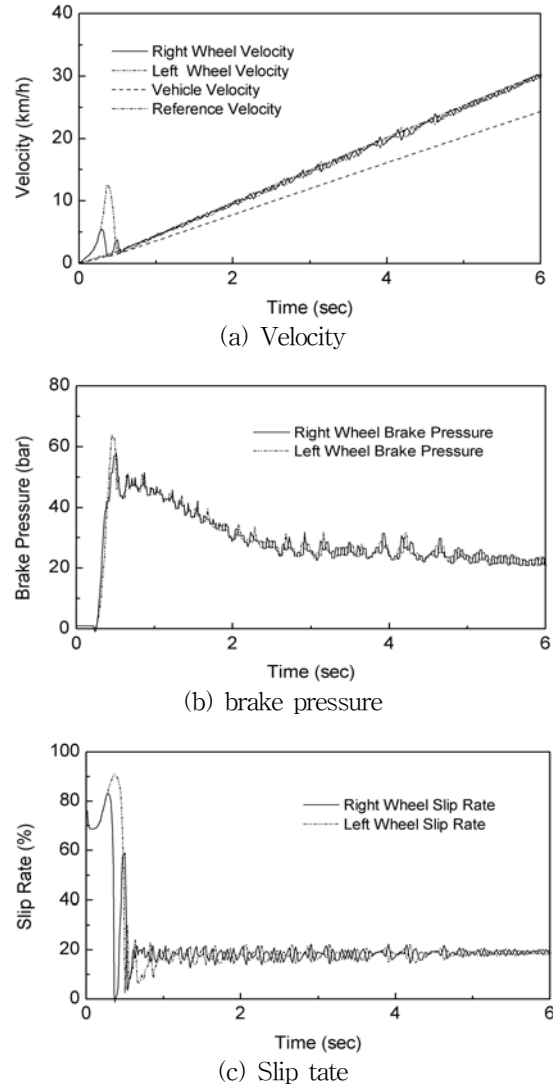


Fig. 7 Vehicle response under low- μ road condition without brake pressure control

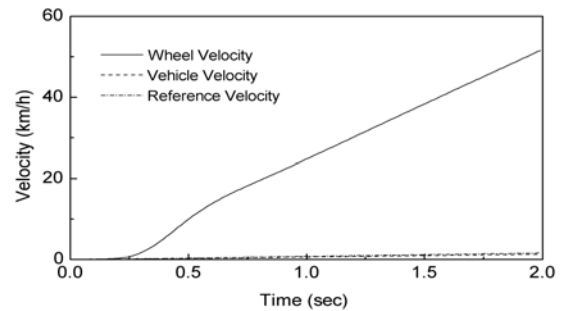


Fig. 8 Vehicle response under slope road condition without brake pressure control

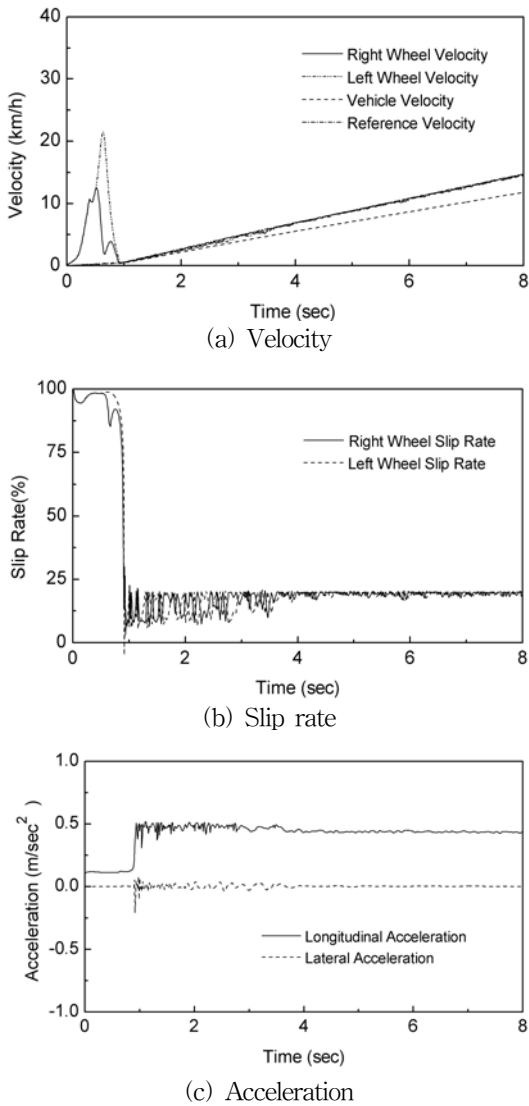


Fig. 9 Vehicle response under slope road condition with brake pressure control

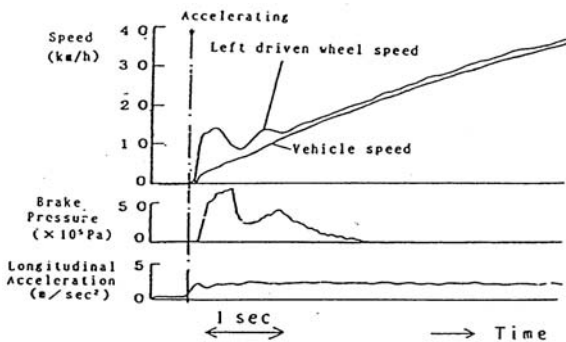


Fig. 10 Test result of vehicle

Fig.10은 좌우륜의 브레이크 압력을 5단계 모드를 이용하여 형성하고 독립적으로 제어하는 차량으로 눈길 노면에서 실차 시험한 결과를 나타낸다.⁵⁾ Fig.10과 앞에서 언급한 시뮬레이션 결과들을 비교 분석하면

실차 실험에서 구동륜 속도 변화와 브레이크 압력 형성의 변화가 시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 서로 유사한 경향을 보여 주고 있으므로 제안한 브레이크 제어 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

브레이크 압력의 추정을 통해 브레이크 압력을 제어할 수 있는 알고리즘을 구성하였고 차량 구동력 제어에 이를 접목시켜 차량 적용성을 고찰하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 솔레노이드 밸브의 구동신호와 작동시간을 이용하여 브레이크 압력을 추정하는 방법을 제안하였고 브레이크 압력 형성 실험을 통해 얻은 결과로부터 추정 방법의 타당성을 확인하였다.
- 2) 차량 구동력 제어의 시뮬레이션 결과로부터 브레이크 압력을 제어 변수로 정하여 직접 제어할 수 있는 가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2010년도 강릉원주대학교 장기해외과연 연구 지원에 의하여 수행한 연구임.

참 고 문 헌

- 1) K. Yamata, *et al* "Traction Control System: Simulation Analysis of the Control System" Int. J. of Vehicle Design, Vol.12, pp89-96, 1991.
- 2) A. T. Van Zanten, "Bosch ESP Systems: 5Years of Experience", SAE Technical Paper Series, 2000-01-1633, 2000.
- 3) 조준상, 유승지, 이교일, "브레이크 게인 적응 휠 슬립 제어에 관한 연구", 유공압건설기계학회논문집, 제4권, 제1호, pp13~17, 2007.
- 4) H. Jung, B. Kwak and Y. Park, "Slip Control Design for Traction Control System" Int. J. of Automotive Technology, Vol.1, No.1, pp48~55, 2000.
- 5) A. Sigl and H. Demel, "ASR-Traction Control, State of Art and Some Prospects", SAE Paper 9002044.
- 6) T. Asamil, Y. Nomura and T. Naganawa, "Traction Control(TRC) System for 1987 Toyota Crown", SAE Paper 890833.