

# 자율주행자동차 가속/제동시스템의 실험적 모델링

## Experimental Modeling of Acceleration and Brake Systems for Autonomous Vehicle

이 종 언\* · 김 영 철\*  
(Jong-Eon Lee · Young Chol Kim)

**Abstract** - For the acceleration and brake systems of an autonomous vehicle, the dynamic models from acceleration (brake) pedal input to driving(braking) torque at the vehicle wheel are represented by a set of linear transfer functions in this paper. We present an experimental method that can identify these models using a single rectangular pulse response data. Various magnitude of inputs with different running speeds are applied to experimental tests. All the identified models are demonstrated by the measured data. Both acceleration and brake models have been also validated by comparing the velocity of a full vehicle model associated with the proposed models with the measured vehicle velocity.

**Key Words** : Autonomous vehicle, Brake system, Acceleration system, Experimental modeling, Identification, Wheel force transducer (WFT).

### 1. 서 론

미국 국방고등연구기획청(defense advanced research projects agency : DARPA)이 주최한 2004, 2005년의 Grand Challenge [1]와 2007년 Urban Challenge [2]를 통해 자율주행자동차에 대한 전 세계의 폭발적 관심을 모았다. 유럽에서는 2010년 이탈리아 Parma 대학의 VisLab 그룹이 주도한 Intercontinental Autonomous Challenge에서 이탈리아 파르마에서중국 상하이까지 13,000 Km를 무인자율주행으로 대륙을 횡단한 결과를 보였다 [3]. 세계 주요 자동차 생산기업과 구글 등 IT기업들도 차세대 자동차기술로서 자율주행자동차의 기술개발에 경쟁적으로 참여하여 수년 내에 상용화를 앞두고 있다. 한국에서도 2009년부터 현대자동차/기아자동차 주관으로 매 2년마다 Autonomous Vehicle Contest(AVC)를 개최하고 있다. 이러한 자율주행차에는 여러 가지 요소기술이 있는데 본 논문에서는 자율주행자동차의 속도제어기 설계 시 요구되는 가속시스템(acceleration system)과 제동시스템(brake system)의 동역학 모델링에 대해 다루고자 한다. 자율주행차가 자동운전 뿐만 아니라 수동운전 기능을 포함해야하는 경우 일반적으로 가감속 페달에 모터 구동기(actuator)가 취부 된다. 자율주행차의 속도제어는 가속페달입력과 제동페달입력의 제어에 의해 이루어지는 2입력 1출력 제어문제로 볼 수 있다. 주행하는 차체(car body)의 종방향 운동모델(longitudinal dynamic model)은 물리적 이론(뉴턴 제2법칙 등)을 적용하여 구할 수 있

는데 차체에 가해지는 힘은 차륜으로부터 전달되는 구동회전력(driving torque)과 제동회전력(braking torque)에 의해 표현된다 [4]. 여기서는 가속페달 입력으로부터 구동 차륜에서의 구동회전력까지 전달체계를 가속시스템이라 하고, 브레이크 페달 입력으로부터 구동 차륜에서의 제동회전력까지 전달체계를 제동(또는 브레이크)시스템이라 부르기로 한다.

가속시스템과 제동시스템은 구성요소의 특성 때문에 별개의 동특성을 가지며 본질적으로 비선형적이다. 더욱이 제동시스템의 경우 브레이크 잠김 방지장치(anti-lock braking system: ABS) 동작과 자동기어 변속으로 정밀한 모델링은 매우 복잡하여 제어기 설계 목적으로는 선형 근사화 모델을 사용하기도 한다[5-8].

본 논문에서는 가속시스템과 제동시스템을 선형전달함수 모델로 가정하고 시험입력을 인가하여 차륜에서의 회전력을 측정된 데이터를 이용하여 입출력모델(input-output model)을 식별하는 방법을 제시하고자 한다. 실험을 위해 가감속 페달에 구동장치와 속도제어기를 갖는 실제 자율주행차량을 이용하며, 가감속 시 바퀴에서의 회전력을 측정하기 위해 휠하중측정장치(wheel force transducer: WFT)을 이용한다. 모델의 파라미터 식별(identification)은 Kim과 Jin의 펄스응답 기반 모멘트 정합기법 [9]을 적용하게 된다. 이 방법에서는 시험입력(test input)을 구형펄스 형식으로 인가해도 충분하기 때문에 저차의 모델식별에 아주 유용하다. 추정된 모델은 측정 데이터와 비교하여 타당성을 검증하게 된다. 추정된 가속시스템과 제동시스템 모델은 Min등 [10]이 개발한 16 자유도 전 차량동역학 모델(full vehicle dynamic model: FVDM)에 연계시켜 차량의 속도를 구한 값과 실제 차량에서 동일한 입력 조건을 인가하여 측정된 속도와 비교함으로써 모델링 결과의 유용성을 보이고자 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서 자율주행차량으로부터 가속 시험데이터를 취득하기 위한 시스템 구성방법을 간단히 기

† Corresponding Author : Dept. of Electronics Eng., Chungbuk National University, Cheongju, Korea  
E-mail : yckim@cbu.ac.kr

\* ADAS team, e-intells Co., erae Group, Daegu, Korea

Received : November 4, 2015; Accepted : March 25, 2016

술한다. 3.1절에서는 Kim과 Jin의 펄스응답의 모멘트 정합을 이용한 모델식별 기법[9]을 요약하고, 3.2절에서는 가속시스템의 모델링을, 3.3절에서는 제동시스템의 모델링과 검증결과를 보인다. 4절에서는 3 절에서 구한 가감속 모델을 Min등의 16 자유도 전차량동역학모델에 적용하여 차량속도를 구하고 이 결과를 동일한 조건에서 실제 차량에서 측정한 속도와 비교한 결과를 보인다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 가속 및 브레이크 시스템 모델링을 위한 데이터 취득 시스템

본 절에서는 가속시스템과 제동시스템의 실험적 입출력 모델을 식별하기 위해 사용된 자율주행차와 실험을 위해 구성한 데이터 취득시스템에 대해 서술한다.

실험을 위해 사용한 차량은 상용 SUV(투싼ix, 2000cc, 가솔린 엔진, 현대자동차, 2010년식)을 자율주행용으로 개조한 모델[10]이다. 이 차량은 조향 휠(steering wheel), 가속 및 브레이크 페달, 오토 트랜스미션 레버 등은 각각 독립적인 구동기(actuator)와 DSP보드로 구현된 제어기로 조절할 수 있도록 개조되었다. 여기에 그림 1 처럼 가감속 시스템 모델링을 위한 데이터 취득 시스템을 구성하였다.

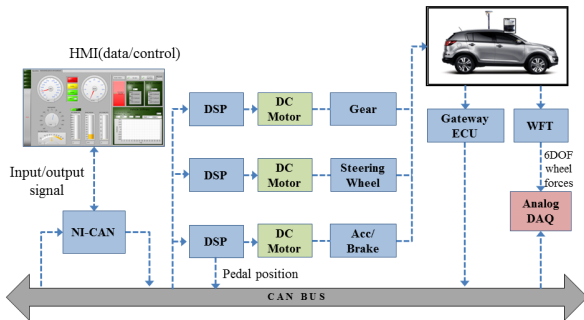


그림 1 가속/브레이크시스템 모델링을 위한 데이터 취득 시스템의 블록선도

Fig. 1 Block diagram of data acquisition system for modeling of acceleration/brake systems

그림 1에서 HMI(human-machine interface)는 LabVIEW<sup>®</sup> (National Instruments Corp.) 기반으로 컴퓨터(노트북 PC)에서 차량과 제어신호, 데이터를 주고받기 위한 인터페이스 프로그램이다. HMI에서 차량의 각종 주행 데이터와 측정 데이터를 받아서 저장하고 실시간 모니터링도 할 수 있다. 차량의 기준속도 지령과 조향각을 입력할 수 있으며 가속페달 입력과 브레이크 페달 입력의 크기와 인가시간을 사용자가 설정할 수 있도록 하였다. 페달 입력은 전체 조작 각도범위를 백분율 하여 10% 단위로 설정할 수 있게 하였으며 HMI 프로그램은 10 ms 주기로 동작한다.

휠하중측정장치 WFT는 자동차부품연구원에서 보유한 MTS사의 SWIFT30 모델[11]을 사용하였으며 차량 좌우 앞바퀴에서 각

각 6축 방향의 힘(x, y, z 축 방향 힘, 피치, 롤, 요 방향의 모멘트)을 측정하여 Analog DAQ 장비를 통해 실시간으로 제공된다. SWIFT30의 세부 제원은 부록 표 A1을 참조한다. 그림 2는 시험차량 전륜에 장착된 WFT와 시험장면을 보여준다.

차량의 각종 주행 데이터(브레이크 압력, 조향각, 트랜스미션 위치, 가속페달 위치, 좌우 바퀴 회전속도, yaw rate, 등)는 Gateway ECU를 통해 받으며 모든 제어신호와 데이터는 CAN 버스를 통해 매 100Hz마다 송수신되도록 구성하였다.

모델링을 위한 차량 주행 시험과 데이터 취득은 자동차부품연구원(충남 천안시 동남구 풍세면 풍세로 303 소재)의 시험트랙(직선 길이 800m)에서 수행되었다.

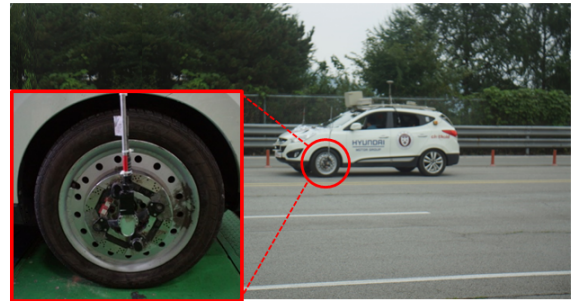


그림 2 차량 전륜에 장착된 WFT와 시험 차량

Fig. 2 Test vehicle mounting the wheel force transducers on the front wheel

## 3. 가속 및 브레이크 시스템의 입출력 모델링

자율주행차량의 속도제어기를 좋은 성능을 갖도록 설계하려면 가속페달입력-차량속도 간 동적 모델과 브레이크페달입력-차량속도 간 동적모델이 필요하다. 일반적으로 차체를 하나의 강체로 가정하고 구동축 바퀴의 회전력을 입력으로 차량속도를 출력으로 하는 모델을 유도하여 이용하는데 이러한 모델에 대해서는 이미 많은 문헌에 제시되어 있다[12, 13]. 본 절에서는 서론에서 언급한 바와 같이 페달 입력-구동바퀴 회전력 간 모델인 가속시스템과 제동시스템의 입출력 모델을 실험적으로 식별하는 방법을 제시하고자 한다. 이 두 시스템은 본질적으로 비선형적이지만 속도제어기를 설계하기 위한 목적으로 사용한다면 저차선형화 모델로도 가능하다고 가정하고 실험적으로 이들 모델을 식별한 후에 측정데이터와 어느 정도의 일치성을 갖는지를 보임으로서 타당성과 유용성을 가능하고자 한다. 3.1절에서는 먼저 입출력모델 파라미터를 식별할 때 이용할 Kim과 Jin의 펄스응답의 모멘트 정합에 의한 2차 시스템 식별 방법을 요약하고, 3.2절에서 가속시스템 모델링을, 3.3절에서는 브레이크 시스템 모델링을 다루기로 한다.

### 3.1 단일 펄스응답의 모멘트 정합을 이용한 연속시간 저차모델의 식별

대부분의 프로세스의 동적특성(dynamics)은 4가지 저차 모델

(low-order models); 1차지연시간(first-order plus time delay: FOTD), 2차무지연시간(second-order with delay free: SODF), 2차지연시간(second-order plus time delay: SOTD), 2차1영점무지연시간(second-order plus a zero with delay free: SOZDF)로 표현할 수 있음은 잘 알려져 있으며 이들 모델을 식별하는 다양한 방법들이 제시되었다. 이 중에서 최근에 Kim과 Jin이 제시한 단일 펄스응답의 모멘트 정합을 이용한 연속시간 저차 모델의 식별[9]은 테스트 입력이 펄스형태여서 실제 시스템에 적용하기가 용이하며, 입력 인가 후 원 상태로 돌아오기 때문에 데이터 취득 시간을 결정하는 것도 쉽다. 더욱이 k차 모멘트는 입력과 응답 데이터를 수치적으로 적분하여 구하기 때문에 취득 데이터의 잡음이 혼입되더라도 적분효과로 인해 견실한 식별 성능을 갖는 것으로 드러났다. 본 논문에서는 이 방법을 적용하게 되며 이 절에서는 식별방법에 대해 간단히 요약하기로 한다.

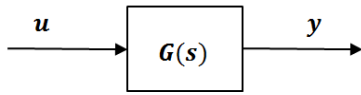


그림 3 저차모델로 식별할 선형 시스템  
Fig. 3 Linear system represented by a low-order model

앞에서 언급한 바와 같이 그림 3의 시스템  $G(s)$ 의 저차 식별 모델을 다음 4가지 형식으로 고려한다.

$$\begin{aligned}
 (1) \text{ FOTD: } G_1(s) &= \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1} \\
 (2) \text{ SODF: } G_2(s) &= \frac{Kw_n^2}{s^2+2\zeta w_n s+w_n} \\
 (3) \text{ SOTD: } G_3(s) &= \frac{Kw_n^2 e^{-Ls}}{s^2+2\zeta w_n s+w_n} \\
 (4) \text{ SOZDF: } G_4(s) &= \frac{Kw_n^2(s+z_0)}{s^2+2\zeta w_n s+w_n}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

여기서,  $K \neq 0, T > 0, L \geq 0, \zeta \geq 0, w_n > 0$  이다.

$G(s)$ 의 임펄스 응답을  $g(t)$ 라 하자. 입력  $u(t)$ , 출력  $y(t)$ , 그리고 시스템  $G(s)$ 의  $i$ 차 모멘트는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 m_i^u &= \int_0^\infty t^i u(t) dt, \quad i=0,1,2,\dots \\
 m_i^y &= \int_0^\infty t^i y(t) dt, \quad i=0,1,2,\dots \\
 m_i^g &= \int_0^\infty t^i g(t) dt, \quad i=0,1,2,\dots
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

그림 3과 같이 식별할 시스템에 그림 4의 펄스입력을 인가하여 그 응답 데이터를 얻을 수 있으며 샘플 데이터를 이용하여 수치적분을 하면 (3.2)의  $i$ 차 모멘트를 계산할 수 있다. 입력이 그림 4처럼 구형펄스이면 모멘트는 펄스 크기 A와 폭 D의 향으

로 간단히 계산된다.

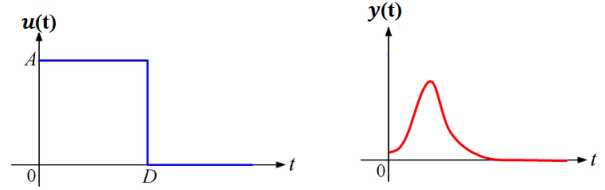


그림 4 모델링을 위해 인가한 펄스입력과 응답의 파형  
Fig. 4 Profiles of the response and a pulse input applied for modeling

[9]의 결과에 의하면 미지 시스템  $G(s)$ 의  $k$ 차 모멘트는 입력과 출력의 모멘트로부터 다음 식으로 구할 수 있다.

$$m_k^g = \frac{1}{m_0^u} [m_k^y - \sum_{i=0}^{k-1} \binom{k}{i} m_{k-i}^u m_i^y], \quad i=1, 2, \dots \tag{3.3}$$

여기서,  $m_0^g = \frac{m_0^y}{m_0^u}$ .

Kim 등의 방법은 (3.2)와 (3.3)을 이용하여 (3.1)의 모델 파라미터를 결정하는 공식을 제시하였는데 한 번의 펄스 응답을 얻으면 (3.1)의 4가지 모델을 모두 구할 수 있으며 각 모델의 응답 결과와 측정된 출력을 비교하여 오차가 가장 낮은 모델을 선택할 수 있다. 여기서는 3.2절과 3.3절에서 최종 모델로 선택된 SODF와 SOZDF 모델 공식만을 기술하고 다른 상세한 내용은 문헌 [9]를 참조하기로 한다.

A. 식 (3.1)의 SODF  $G_2(s)$  모델 파라미터 결정 공식:

$$\begin{aligned}
 (i) \hat{K} &= \frac{m_0^y}{AD} \\
 (ii) \hat{w}_n &= \sqrt{\frac{2}{2(\frac{m_1^y}{m_0^y}) - \frac{m_2^y}{m_0^y} - D\frac{m_1^y}{m_0^y} + \frac{1}{3}D^2}} \\
 (iii) \hat{\zeta} &= \frac{1}{2}(\frac{m_1^y}{m_0^y} - \frac{1}{2}D)\hat{w}_n
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

B. 식 (3.1)의 SOZDF  $G_4(s)$  모델 파라미터 결정 공식:

$$\begin{aligned}
 (i) \hat{K} &= \frac{1}{AD}[(\theta_1^* + \frac{D}{2})m_0^y - m_0^g] \\
 (ii) \hat{z}_0 &= \frac{m_0^y}{AD\hat{K}} \\
 (iii) \hat{w}_n &= \sqrt{\frac{1}{\theta_2^*}} \\
 (iv) \hat{\zeta} &= \frac{1}{2}\theta_1^* \hat{w}_n
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

여기서,

$$\theta_1^* := \frac{m_3^y m_0^y - 3m_2^y m_1^y - 3D(m_1^y)^2 + \frac{3}{2}D^2 m_1^y m_0^y + \frac{1}{4}D^3 (m_0^y)^2}{3m_2^y m_0^y - 6(m_1^y)^2 + 3Dm_1^y m_0^y - D^2 (m_0^y)^2} \quad (3.6)$$

$$\theta_2^* := \frac{A}{6m_2^y m_0^y - 12(m_1^y)^2 + 6Dm_1^y m_0^y - 2D^2 (m_0^y)^2} \quad (3.7)$$

여기서,  $A = [2m_3^y m_1^y - Dm_3^y m_0^y - 3(m_2^y)^2 + 3Dm_2^y m_1^y + \frac{1}{2}Dm_2^y m_0^y - 2D^2(m_1^y)^2 + \frac{1}{2}D^3 m_1^y m_0^y - \frac{1}{12}D^4 (m_0^y)^2]$ .

### 3.2 가속시스템의 모델링

서론에서 자율주행차량의 가속페달 각도입력으로부터 구동 차륜에서의 구동회전력까지 전달체계를 가속시스템이라 정의하였다. 2절의 시험차량 가속페달에는 DC모터를 이용한 구동기가 취부되어 있으며 구동시스템 자체도 피드백제어 루프를 포함하여 동특성을 갖는다. 가속페달 입력은 엔진의 스로틀 밸브(throttle valve)를 통해 엔진의 흡기량을 조절하여 구동축 바퀴의 회전력을 변하게 한다. 이러한 가속시스템은 본질적으로 비선형성을 갖지만 그림 5와 같이 근사적 선형모델로 간주하여 저차 모델링을 하고자 한다.

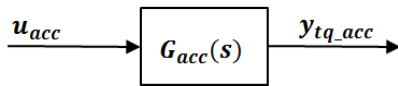


그림 5 가속시스템의 선형 근사화 모델  
Fig. 5 Linearly approximate model of acceleration system

3.1절의 모델링 방식을 이용하기 위해 다음과 같이 시험조건을 고려하였다.

#### A. 모델링을 위한 실험 조건

- 가속페달 입력 파형: 구형 펄스 (그림 4 좌도 참조)
- 가속페달 입력 펄스 크기(A): 페달 조작 최대각도의 40, 50, 60 % 3종
- 가속페달 입력 펄스 폭(D): 10 sec
- 시험 회수: 40% 입력 x 2회, 50%와 60% 입력 시험 각 1회 (총 4회)
- 출력: 좌우 앞바퀴에 부착된 WFT센서의 피치방향 모멘트( $M_y$ )
- 시험차량은 자동변속기 (automatic transmission)를 포함하고 있고, 가속에 따른 기어 변속이 생겨 응답에 영향을 주더라도 이를 그대로 모델링에 반영한다. [실제 자율주행상황에서도 유사한 기어변속 동작이 수반됨]

#### B. 모델링 결과

가속페달의 펄스 입력과 바퀴에서의 측정된 회전력 데이터를 이용하여 3.1절의 식별 방법을 적용해 본 결과 가속시스템의 모

델은 (3.1)의 4가지 모델 중에서 다음 SOZDF모델이 근접성이 가장 좋게 나왔다.

$$G_{acc}(s) := \frac{y_{tq\_acc}(s)}{u_{acc}(s)} = \frac{b_1 + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (3.8)$$

40% 입력 실험 2회, 50%와 60% 입력 실험 각 1회 등 총 4회의 실험을 수행한 데이터에 대한 (3.8)의 모델 파라미터는 표 1에 정리하였다. 여기서 40% 모델 파라미터는 2회 실험데이터의 평균치를 기재하였다.

그림 6은 표 1의 평균모델 파라미터를 적용한 (3.8)의 가속시스템 모델에 대한 펄스응답과 이와 동일한 40%페달 입력을 인가 시 측정하여 얻은 바퀴에서의 구동력을 비교한 것이다. 적색 점선은 측정된 출력이고 청색 파선은 식별한 모델의 응답을 나타낸다. 그림 6에 표시된 바와 같이 21초 동안 자동변속기에 의한 4번의 기어변동이 있었으며 이 영향으로 구동력이 변화하였음을 보

표 1 자율주행차 가속시스템 모델  $G_{acc}(s)$ 의 식별 파라미터: 가속페달입력 크기 40, 50, 60%인 경우

Table 1 Identified parameters of the acceleration system,  $G_{acc}(s)$ , for the cases of different acc. pedal inputs; 40, 50, 60 % and 10 sec duration.

파라미터	가속페달 입력 크기			평균값
	40% (2회 평균)	50%	60%	
$b_1$	0.2994	0.1091	0.08698	0.16516
$b_0$	0.072595	0.09507	0.8072	0.082795
$a_2$	1.000725	0.2927	0.3809	0.5581083
$a_1$	2.1165	0.3627	0.4281	0.9691
$a_0$	1	1	1	1

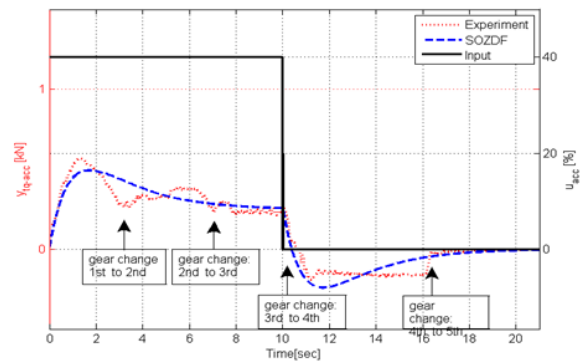


그림 6 40%의 페달입력 인가 시 가속시스템 평균모델의 응답과 측정응답 비교

Fig. 6 Comparison of the pulse response of the average identified model and measured output to the 40% pulse input for acceleration system.

여주고 있다. 자동변속기의 동작 상태는 2절 그림 1에서 설명한 gateway를 통해 주어지며 실험과 동시에 기록된 데이터 시트로 부터 확인된다.

그림 7과 그림 8은 그림 6과 유사하게 가속시스템의 평균 모델을 50%와 60% 펄스 페달입력에 대한 측정응답과 비교한 결과이다. 이 결과로부터 간단한 SOZDF 모델로 가속시스템 동적 모델을 제시하였다. 부분적으로 오차가 있는 구간도 보이지만 자동 변속기 동작에 의해 발생하는 비선형성을 하나의 선형 모델로 표현하는 것은 구조적으로 어렵다. 즉, (3.8)과 표 1의 가속시스템 모델은 속도제어기를 설계할 때 유용하게 사용할 수 있는 적합도를 갖는다고 판단된다.

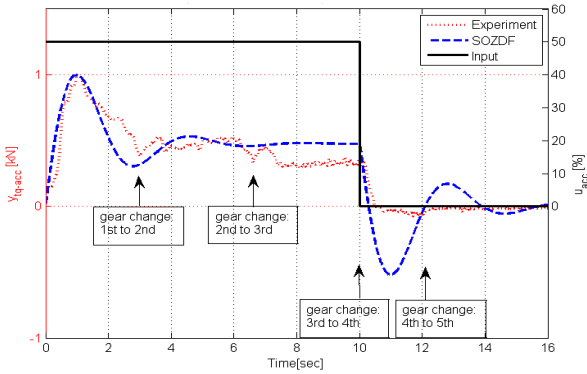


그림 7 50%의 페달입력 인가 시 가속시스템 평균모델의 응답과 측정응답 비교

Fig. 7 Comparison of the pulse response of the average identified model and measured output to the 50% pulse input for acceleration system.

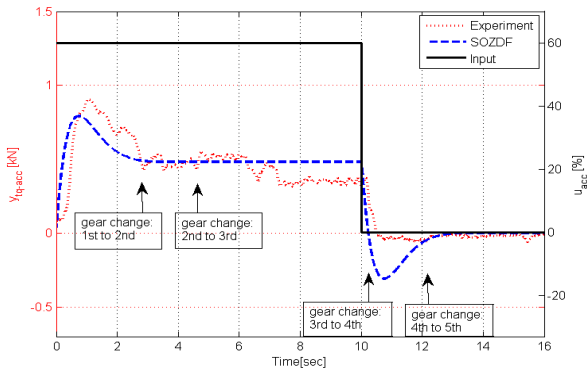


그림 8 60%의 페달입력 인가 시 가속시스템 평균모델의 응답과 측정응답 비교

Fig. 8 Comparison of the pulse response of the average identified model and measured output to the 60% pulse input for acceleration system.

### 3.3 브레이크시스템의 모델링

서론에서 자율주행차량의 브레이크 페달 각도입력으로부터 구

동 차량에서의 제동회전력까지 전달체계를 제동시스템이라 정의하였다. 2절의 시험차량 가속페달에는 DC모터를 이용한 구동기가 취부 되어 있으며 구동기 자체도 피드백제어 루프를 포함 동특성을 갖는다. 브레이크 페달입력은 진공부스터(vacuum booster)를 통해 마스터 실린더의 압력을 조절하여 전후 대각선에 위치한 바퀴의 회전력을 조절하게 한다. 이러한 제동시스템은 본질적으로 비선형성을 갖지만 그림 9와 같이 근사적 선형모델로 간주하여 저차 모델링을 하고자 한다.

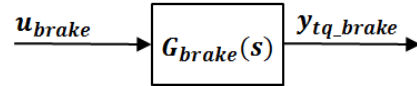


그림 9 제동시스템의 선형 근사화 모델

Fig. 9 Linearly approximate model of brake system

3.1절의 모델링 방식을 이용하기 위해 다음과 같이 시험조건을 고려하였다.

#### C. 모델링을 위한 실험 조건:

- 브레이크 페달 입력 파형: 구형 펄스 (그림 4 왼쪽 참조)
- 제동입력 인가 직전의 차량 운행속도: 40, 60 km/h 정속도 (2종)
- 브레이크 페달 입력 펄스 크기(A): 페달 조작 최대각도의 30, 50, 70 % 3종
- 브레이크페달 입력 펄스 폭(D): 2, 3, 4 sec (3종)
- 시험 회수 (총 28회):
  - (i) 40 km/h 속도 시 페달입력의 펄스 크기별 폭 별로 9종의 조건에 대해 각각 2회씩 18회,
  - (ii) 60 km/h 속도 시 페달입력의 펄스크기 50, 70 %별로 폭별로 6종의 조건에 대해 각각 2(또는 1)회씩 10회.
- 출력: 좌우 앞바퀴에 부착된 WFT센서의 피치방향 모멘트( $M_y$ )
- 시험차량은 자동변속기 (automatic transmission)를 포함하고 있고, 감속에 따른 기어 변속이 생겨 응답에 영향을 주더라도 이를 그대로 모델링에 반영한다. [실제 자율주행상황에서도 유사한 기어변속 동작이 수반됨]

#### D. 모델링 결과

브레이크 페달의 펄스 입력과 바퀴에서의 측정된 회전력 데이터를 이용하여 3.1절의 식별 방법을 적용해 본 결과 가속시스템의 모델은 (3.1)의 4가지 모델 중에서 다음 SODF모델이 근접성이 가장 좋게 나왔다.

$$G_{brake}(s) := \frac{y_{tq-brake}(s)}{u_{brake}(s)} = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (3.9)$$

실험은 크게 두 그룹으로 분류된다. 첫 번째는 차량을 40km/h 정속 주행 시 페달입력의 펄스 크기 30, 50, 70% 일 때, 펄스폭을 각각 2, 3, 4초로 한 경우에 바퀴에서의 제동력을 WFT로 측정하였다. 이를 수행하기 전에 동일 주행조건에서 브레이크 입력을 인가하지 않은 경우에 자연감속에 의한 제동력 데이터를 취득하였다. 이 데이터는 브레이크 입력에 의한 제동력 응답 데이터

를 얻기 위해 사용된다. 두 번째는 차량을 60 km/h 정속 주행 시 페달입력의 펄스 크기 50, 70% 일 때, 펄스폭을 각각 2, 3, 4 초로 한 경우에 바퀴에서의 제동력을 WFT로 측정하였다.

부록의 표 A2는 40km/h 주행 시 9종의 펄스 입력에 대한 응답을 각 2회씩 총 18회의 실험 데이터를 취득하여 구한 (3.9) 모델 파라미터이다. 이 표 A2로부터 입력 크기별 평균치와 전체평균을 요약하여 표 2에 보인다.

**표 2** 자율주행차 브레이크 시스템 모델  $G_{brake\_40km}(s)$ 의 입력 크기별 식별파라미터 (초기주행속도: 40 km/h).

**Table 2** Identified parameters of the brake system,  $G_{brake\_40km}(s)$ , for the cases of different brake pedal inputs: 40, 50, 60 % at 40km/h.

실험입력 크기	모델 (3.9)의 파라미터			
	$b_0$	$a_2$	$a_1$	$a_0$
30%	0.0520967	0.0343817	0.3030167	1
50%	0.0631783	0.0186232	0.1269267	1
70%	0.0652183	0.0242405	0.2781167	1
40 km/h 평균 모델	0.0601644	0.0257484	0.23602	1

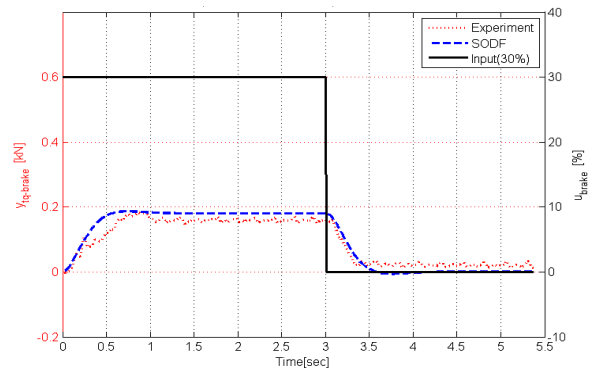
마찬가지로 부록의 표 A3는 60km/h 주행 시 6종의 펄스 입력에 대한 응답을 각 1, 2회씩 총10회의 실험 데이터를 취득하여 구한 (3.9) 모델 파라미터이다. 이 표 A3로부터 입력 크기별 평균치와 전체평균을 요약하여 표 3에 보인다. 40 km/h모델과 60 km/h 모델은 DC이득도 다르고 극도 크게 다를 수 있다.

**표 3** 자율주행차 브레이크 시스템 모델  $G_{brake\_60km}(s)$ 의 입력 크기별 식별 파라미터 (초기주행속도: 60 km/h).

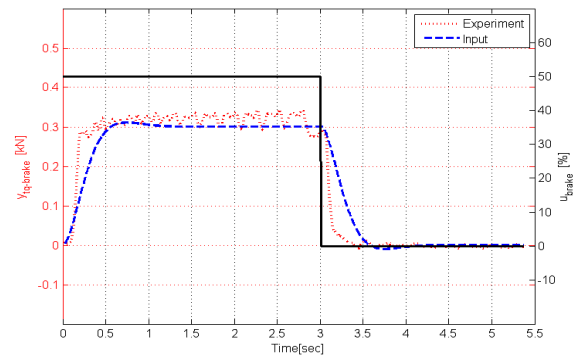
**Table 3** Identified parameters of the brake system,  $G_{brake\_60km}(s)$ , for the cases of different brake pedal inputs: 40, 50, 60 % at 60 km/h.

실험입력 크기	모델 (3.9)의 파라미터			
	$b_0$	$a_2$	$a_1$	$a_0$
50%	0.0725217	0.0099714	0.2091833	1
70%	0.0708233	0.008131	0.1919333	1
60 km/h 평균모델	0.0716725	0.0090512	0.2005583	1

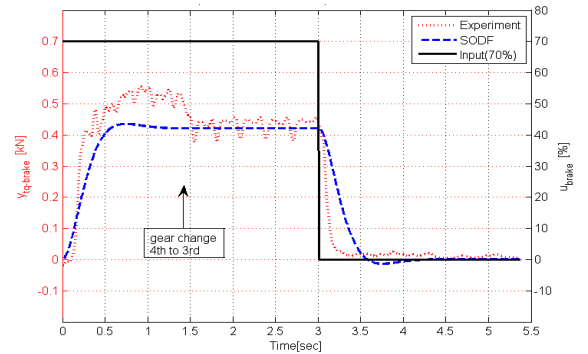
표 2와 표 3에서 구한 제동시스템 모델의 적합성을 검증하기 위해 각각의 평균 파라미터 모델의 펄스 응답을 측정데이터와 비교하기로 한다. 그림 9(a), (b), (c)는 표 2의 40 km/h 평균모델 파라미터를 적용한 (3.9)의 제동시스템 모델에 30, 50, 70% 페달 입력을 인가 시 구한 펄스응답과 이와 동일한 페달 입력을 인가 시 측정하여 얻은 바퀴에서의 구동력을 비교한 것이다. 적색 점선은 측정된 출력이고 청색 파선은 식별한 모델의 응답, 흑색 실



(a) 30% pulse brake input at 40 km/h



(b) 50% pulse brake input at 40 km/h



(c) 70% pulse brake input at 40 km/h

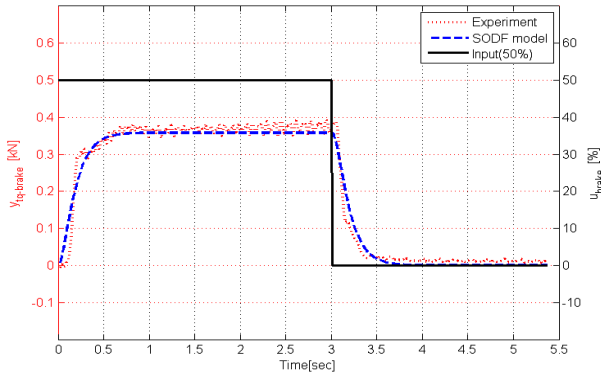
**그림 9** 40 km/h 주행 중 펄스 브레이크 입력 시 제동시스템 평균모델의 응답과 측정응답 비교: (a) 30%, (b) 50%, (c) 70% 브레이크 입력

**Fig. 9** Comparison of the pulse response of the average identified model and measured output to different pulse brake inputs at 40 km/h speed: (a) 30%, (b) 50%, (c) 70% inputs to the brake system

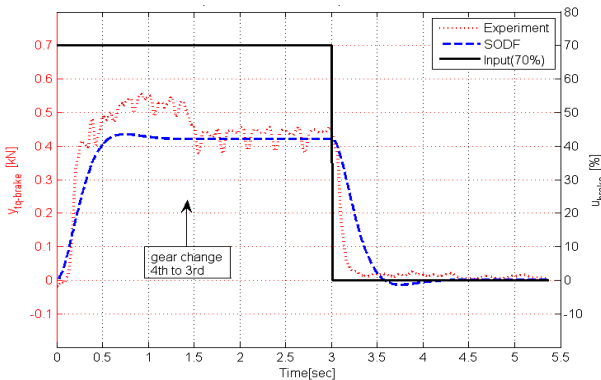
선은 인가한 페달 제동입력 파형을 나타낸다. 그림 9(c)의 70% 입력을 인가 한 경우 약 1.4초에서 자동변속기에 의한 기어변동

(4단에서 3단으로)이 있었으며 이 영향으로 구동력이 변하였음을 보여주고 있다. 세 경우 모두 평균모델의 응답이 측정치와 유사한 결과를 보여주며 특히 DC이득은 30% 경우에서 약간의 오차가 있으나 다른 두 경우는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 10(a), (b)는 표 3의 60 km/h 평균모델 파라미터를 적용한 (3.9)의 제동시스템 모델에 50, 70% 페달 입력을 인가 시 구한 펄스응답과 이와 동일한 페달 입력을 인가 시 측정하여 얻은 바퀴에서의 구동력을 비교한 것이다.



(a) 50% pulse brake input at 60 km/h



(b) 70% pulse brake input at 60 km/h

그림 10 60 km/h 주행 중 펄스 브레이크 입력 시 제동시스템 평균모델의 응답과 측정응답 비교: (a) 50%, (b) 70% 브레이크 입력

Fig. 10 Comparison of the pulse response of the average identified model and measured output to different pulse brake inputs at 60 km/h speed: (a) 50%, (b) 70% inputs to the brake system

#### 4. 16DOF 전차량동역학 모델을 이용한 가감속 모델 검증

본 절에서는 3절에서 구한 가속시스템 모델과 제동시스템 모델을 Min 등[12, 13]의 시험차량에 대한 16자유도 전차량동역학

모델(FVDM)에 연결하여 가속/브레이크 입력을 인가 시 차량의 속도를 구하고 동일한 조건에서 실 차량에서 측정된 속도와 비교함으로써 모델의 정당성을 보이고자 한다. 그림 11은 이를 나타내는 블록선도이다.  $\tau_{d-wh}$ ,  $\tau_{b-wh}$ 는 바퀴에서의 구동 및 제동토크를 나타낸다. Min의 FVDM은 바퀴에서의 구동토크와 제동토크를 입력으로 하고 있으며, 가속/브레이크 페달로부터 바퀴까지의 전달 모델은 3절에서 구한 전달함수를 사용한다. FVDM의 정당성[12, 13]은 이미 검증되었으므로 동일한 크기의 가속페달 입력과 브레이크 페달 입력을 차량모델과 실제 차량에 인가하여 속도를 비교하게 된다.

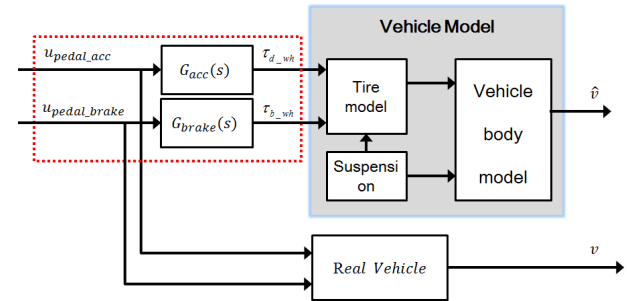


그림 11 차량동역학모델에 접속한 가속/제동시스템 모델과 실제 차량의 속도 비교

Fig. 11 Full vehicle dynamic model combined with the acc/brake system models and comparison of velocity between FVDM and real vehicle to the acc/brake inputs.

실험은 가속시스템 검증과 제동시스템 검증을 나누어 시행하였다. 가속실험에서는 가속페달의 입력을 각각 40, 50, 60% 크기이고 10초간 동일한 크기로 인가하였을 때 모델의 속도  $\hat{v}$ 와 실

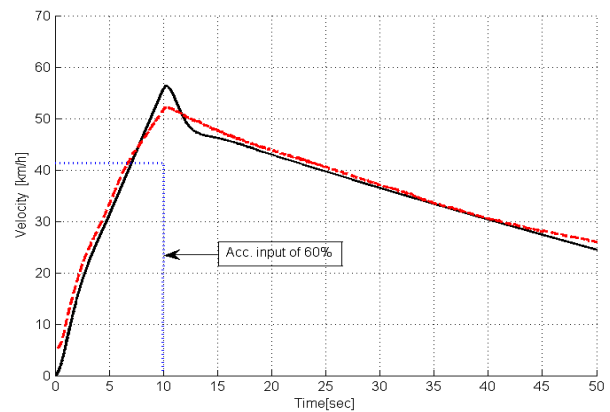
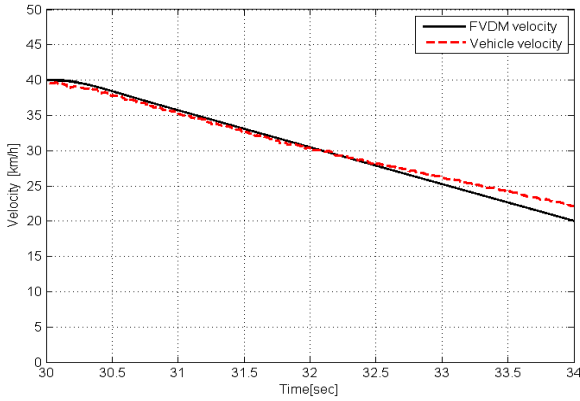


그림 12 60%-10초 펄스 가속입력에 대한 FVDM 속도와 실제 차량의 속도 비교

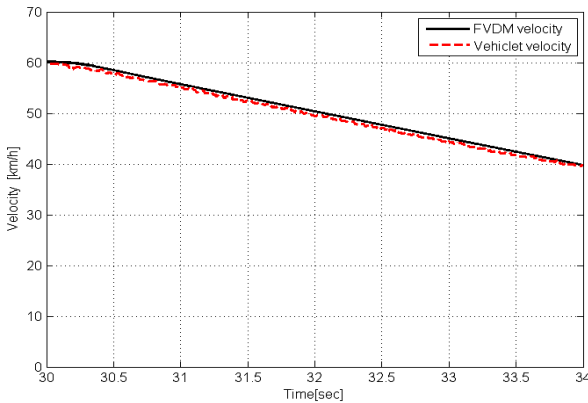
Fig. 12 Comparison of velocities of the real vehicle and FVDM to the acc. input of 60% magnitude and 10 sec duration.

차량의 속도  $v$ 를 구하여 비교하였다. 세 경우 모두 유사한 일치 결과를 보였으며 여기서는 그림 12와 같이 60% 입력에 대한 결과를 보인다.

제동실험에서는 주행속도 40km/h, 60km/h에서 브레이크 페달의 입력을 각각 30, 50, 70% 크기이고 4초간 동일한 크기로 인가하였을 때 모델의 속도  $\hat{v}$ 와 실 차량의 속도  $v$ 를 구하여 비교하였다. 대부분의 결과가 유사한 일치도를 보였다. 그림 13(a), (b)는 각각 40km/h, 60km/h에서 브레이크 입력 펄스 50%, 4초 일 때의 결과이다. 기준 주행속도에 도달한 후 30 초에서 제동입력을 인가하여 4초간 지속하였을 때 속도변화를 구하였다.



(a) Brake input of 50% and 4 sec at 40 km/h



(b) Brake input of 50% and 4 sec at 60 km/h

**그림 13** 차량속도 40, 60 km/h에서 50%-4초 펄스 제동입력에 대한 FVDM속도와 실제차량의 속도 비교

**Fig. 13** Comparison of velocities of the real vehicle and FVDM to the brake input of 50% and 4 sec at the vehicle speed of 40 and 60 km/h.

위의 가속실험과 제동실험을 통해 3장에서 구한 가속시스템과 제동시스템 모델이 실제 대상 자율주행차량의 동적특성을 비교적 잘 구해졌다고 판단할 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 자율주행차의 속도제어기 설계 시 필요한 가속 시스템과 제동시스템의 입출력 모델을 실험적으로 구하는 방법을 제시하였다. 가속시스템은 가속페달로부터 구동축 바퀴의 회전력까지를 나타내며 제동시스템은 브레이크 페달로부터 바퀴에서의 제동력까지로 정의하였다. 이 두 시스템은 본질적으로 비선형성 요소를 포함하지만 몇 개의 동작점(페달입력 과 주행속도)에서 선형이라고 가정하고 정밀한 모델 보다는 제어기설계를 용이하게 하는 2차이하의 저차근사모델을 구하는 것을 목표로 하였다. 이러한 목적에 적용할 수 있는 모델 식별방법으로 구형과 펄스응답으로부터 4가지 저차모델의 파라미터를 견실하게 구하는 Kim 등의 모멘트정합기법을 이용하였다. 실제 차량에 측정장치를 부착하고 가속실험 4회, 제동실험 28회를 수행하여 취득한 데이터로부터 모델링을 한 결과 가속시스템은 SOZDF모델, 제동시스템은 SODF모델이 가장 적합한 모델 구조이고 실제 차량의 측정데이터와 잘 일치함을 보였다. 또한 이 두 모델을 전차량동적모델(FVDM)과 연계하여 가속 및 브레이크 페달 입력에 대한 차량속도를 구하여 실제 차량(현대 Tucson ix 2000cc)에 동일 조건의 입력에 대한 속도와 비교하였으며 이를 통해 모델의 타당성을 검증하였다. 이러한 실험적 모델링 기법은 차량의 다른 동적 시스템의 모델링에도 유사하게 적용할 수 있을 것이다.

여기서는 평균모델을 구하여 검증하였으나 각 동작점에서 추정된 모델 셋들은 보다 개선된 성능을 얻기 위해 다중모델제어방식을 도입하는 경우에도 유용하게 사용할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 2014년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의해 이루어진 결과입니다.

### References

- [1] S. Thrun, et al. 29, "Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge," J. of Field Robotics, vol. 23, no.9, 2006, 661-692.
- [2] C. Urmson et al 41, "Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge," J. of Field Robotics, vol. 25, no.8, pp.425-466, 2008.
- [3] A. Broggi, P. Medici, P. Zani, A. Coati, and M. Panciroli, "Autonomous vehicle control in the VisLab International Autonomous Challenge," Annual Reviews



in Control, vol.36, pp.161-171, 2012.

[4] R. Rajamani, "Vehicle Dynamics and Control," Springer Verlag, 2005.

[5] J.K. Hedrick, J.C. Gerdes, D.B. Maciucă, D. Swaroop, "Brake System Modeling, Control and Integrated Brake/Throttle Switching : Phase I," Technical Report UCB-ITS-PRR-97-21, California Partners for Advanced Transit and Highways, 1997.

[6] W.K. Lennon and K. M. Passino, "Intelligent Control for Brake Systems," IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol.7, no.2, pp.188-202, 1999.

[7] V. Cirvic and D. Aleksendric, "Intelligent Control of Automotive Braking System," Proc. of the FISITA World Automotive Congress, pp.14-19, Munich, Germany, Sep. 2008.

[8] S. Min and K. Yi, "Modeling of Hydraulic Brake system and Experimentation using Equipped Test Vehicle," Proc. of KSAE Annual Autumn Conference, pp.597-602, 2001.

[9] Y.C. Kim and L.H. Jin, "Robust identification of continuous-time low-order models using moments of a single rectangular pulse response," Journal of Process Control, vol. 23, no.5, pp.682-695, 2013.

[10] K. Min and Y.C. Kim, "An Autonomous Vehicle: CBNU-Clothoid V1," Robot and Human, vol.10, no.2, pp. 11-19, 2013.

[11] MTS Systems Corp., SWIFT 30 Sensor Product Information, [online] <http://www.mts.com>

[12] K. Min, "Three-Dimensional Full Vehicle Dynamic Modelling and Guidance Control Design," Ph.D. thesis, Chungbuk National University, Korea, 2014.

[13] K. Min, Y. S. Byun, Y. C. Kim, "Modeling and Validation of 16 DOF Full Vehicle Model for Guidance Control," International Journal of Vehicle System Modelling and Testing, vol.10, no.4, pp. 392-416, 2015.

부 록

표 A1 휠하중측정장치 (SWIFT30, MTS Systems Corp.) 명세 [11]

Table A1 Specifications of the WFT (SWIFT30, MTS Systems Corp.) [11]

Parameter	Specification
Maximum usable rpm	2,200
Maximum speed	240 kph (150 mph)
fits rim size(usable range)	12 - 15 inch*
Input voltage required	10 - 17 VDC
Input power required per transducer	30 W maximum (22 W typical)
Output voltage ±full scale calibrated load	±10 V
SAE J328 rated load capacity	6.5 kN (1,460 lbf)
Longitudinal force (Fx)	±28 kN (±6,295 lbf)
Lateral force range (Fy)	±23 kN (±5,170 lbf)
Vertical force range (Fz)	±28 kN (±6,295 lbf)
Overturning moment (Mx)	±5 kN • m (±44,255 lbf • in)
Driving/braking moment (My)	±7.5 kN • m (±66,380 lbf • in)
Steering moment (Mz)	±5 kN • m (±44,255 lbf • in)
Resolution (analog system)	Infinite
Noise level (peak-to-peak 0-500 Hz)	15 N (3.4 lbf)
Non-linearity	1.0% full scale
Hysteresis	0.5% full scale
Modulation§	≤3.0% reading
Cross talk#	1.5% full scale
Low level amplifiers	70°
Transducer interface	50°

**표 A2** 자율주행차 브레이크 시스템 모델  $G_{brake\_40km}(s)$  의 실험조건별 식별 파라미터 (초기주행속도: 40 km/h)

**Table A2** Identified parameters of the brake system,  $G_{brake\_40km}(s)$ , for the cases of different brake pedal inputs; 40, 50, 60 % magnitudes and 2, 3, 4 sec widths at 40 km/h vehicle speed.

페달 입력펄스		실험번호	모델 (3.9)의 파라미터			
크기 (A)	폭(D)		$b_0$	$a_2$	$a_1$	$a_0$
30 %	2sec	Ex_40_1	0.05345	0.03752	0.4001	1
		Ex_40_2	0.05536	0.0206	0.3558	1
		Ex_40_3	0.05262	0.03141	0.4306	1
	3sec	Ex_40_4	0.05302	0.02519	0.3046	1
		Ex_40_5	0.04856	0.01789	0.227	1
	4sec	Ex_40_6	0.04917	0.0799	0.226	1
		30% 평균모델	0.0520967	0.03438167	0.30301667	1
50 %	2sec	Ex_40_7	0.06743	0.01604	0.1898	1
		Ex_40_8	0.06745	0.008845	0.1631	1
	3sec	Ex_40_9	0.06192	0.03627	0.1344	1
		Ex_40_10	0.06333	0.03509	0.1519	1
	4sec	Ex_40_11	0.06005	0.004104	0.06107	1
		Ex_40_12	0.05889	0.01139	0.06129	1
	50% 평균모델	0.0631783	0.0186232	0.1269267	1	
70 %	2sec	Ex_40_13	0.06255	0.005389	0.1696	1
		Ex_40_14	0.06734	0.01796	0.1598	1
	3sec	Ex_40_15	0.06461	0.01245	0.1365	1
		Ex_40_16	0.067	0.007023	0.1332	1
	4sec	Ex_40_17	0.06391	0.04484	0.9436	1
		Ex_40_18	0.06111	0.04521	0.1358	1
	70% 평균모델	0.0652183	0.0242405	0.2781167	1	
40 km/h 평균 모델			0.06016444	0.02574844	0.23602	1

**표 A3** 자율주행차 브레이크 시스템 모델  $G_{brake\_60km}(s)$  의 실험조건별 식별 파라미터 (초기주행속도: 60 km/h)

**Table A3** Identified parameters of the brake system,  $G_{brake\_60km}(s)$ , for the cases of different brake pedal inputs; 40, 50, 60 % magnitudes and 2, 3, 4 sec widths at 60 km/h vehicle speed.

페달 입력펄스		실험번호	모델 (3.9)의 파라미터			
크기 (A)	폭(D)		$b_0$	$a_2$	$a_1$	$a_0$
50 %	2sec	Ex_60_1	0.07295	0.0008985	0.2355	1
		Ex_60_2	0.07823	0.001953	0.2538	1
	3sec	Ex_60_3	0.07251	0.02188	0.2088	1
		Ex_60_4	0.07458	0.0008571	0.2158	1
	4sec	Ex_60_5	0.06943	0.01712	0.1716	1
	50% 평균모델	0.07252167	0.00997143	0.2091833	1	
	70 %	2sec	Ex_60_6	0.0722	0.01531	0.2189
Ex_60_7			0.07303	0.01866	0.2241	1
3sec		Ex_60_8	0.07151	0.008453	0.1934	1
		Ex_60_9	0.07102	0.004819	0.1736	1
4sec		Ex_60_10	0.06859	0.001772	0.1718	1
70% 평균모델		0.07082333	0.008131	0.1919333	1	
60 km/h 평균 모델			0.0718725	0.0090512	0.2005583	1

## 저 자 소 개



### 이 종 언 (Jong-Eon Lee)

2012년 한국교통대학교 제어계측공학(공학사), 2015년 충북대학교 전자공학(공학석사), 2015년~현재 이레그룹 e-intells(연구원), 관심분야는 ADAS system. 자율주행 자동차 제어시스템, 시스템 모델링.



### 김 영 철 (Young Chol Kim)

1981년 고려대학교 전기공학과(공학사), 1983년 서울대학교 전기공학과(공학석사), 1987년 서울대학교 전기공학과(공학박사), 1988년~현재 충북대학교 전자공학부 교수. 1992년~1993년 미국 Texas A&M Univ. Post-Doctoral Fellow. 2001년~2002년 미국 Vanderbilt Univ./Tennessee State Univ. 방문교수. 2004년~2008년 KIEE 제어계측연구회장, 2006년~2008년 KIEE 정보 및 제어 부문회 부회장, 2009년~2010년 KIEE 정보 및 제어 부문회 회장, KIEE 부회장. 관심분야 : 저차제어기 설계, 자율주행차 제어시스템, 시스템 모델링 등.