〈논 문〉 SAE NO. 98370037

ABS를 위한 HIL시뮬레이터 개발

Development of Hardware-In-The-Loop Simulator for ABS

서 명 원*, 김 석 민**, 정 재 현**, 석 창 성*, 김 영 진*, 이 선 일***, 이 재 천****
M.W.Suh, S. M.Kim, J.H.Chung,C.S.Seok, Y. J.Kim, S. I. Lee, J. C. Lee

ABSTRACT

The prevalence of microprocessor-based controllers in automotive systems has greatly increased the need for tools which can be used to validate and test control systems over their full range of operation. The objective of this paper is to develop a real time simulator of an anti-lock braking system and the methodology of using hardware-in-the-loop simulation based on a personal computer. By use of this simulator, the analyses of a commercial electronic control unit as well as the validation of the developed control logics for ABS were performed successfully. The simulator of this research can be applied to development of more advanced control system, such as traction control systems, vehicle dynamic control system and so forth.

주요기술용어 : Anti-lock brake system(ABS), Hardware in the loop(HIL), Real time simulator(실시간 시뮬레이터), ECU(전자제어장치), HCU(유압제어장치)

1. 서 론

1980년대 후반에 들어서면서 차량의 성능을 최적화하기 위한 노력의 일환으로 마이크로프로세서를 이용한 다양한 차량 시험방법이 개발되었는데, 특히 최근 들어 각광받고있는 차량 시험방법으로 하드웨어-인-더-루프(Hardware-in-the-loop : HIL)시뮬레이션이 있다. HIL방법은 기존의 소프트웨어 시뮬레이션 알고리즘에서 비선형성이 심하거나 해석하기 어려운 부분을 실제 하드웨어로 대체하여 시뮬레이션을 수행하는 것으로써 현실적으로 전체 시스템의 실험이 불가

* 정회원, 성균관대학교 기계공학부
** 성균관대학교 대학원
*** 삼성전기 주식회사
**** 계명대학교 자동차공학과

능하거나 시험비용이 고가인 우주항공산업분야에서 처음으로 적용하였다.

안티-록-브레이크 시스템(Anti-lock-brake system : ABS)은 차량의 제동성과 조향성을 향상시키기 위한 제어장치의 하나로써, 이 시스템의 시험을 수행하기 위해서는 복잡한 시스템 제어인자의 조절뿐만 아니라 다양한 노면조건이나 환경을 조성해야하므로 선진 자동차 회사에서는 HIL방법을 적용하여 시간과 비용의 절감뿐 아니라 시험의 질을 향상시키고 있다. HIL방법을 적용하면 실제상황과 유사한 실험을 수행함으로써 실차 시험횟수를 줄일 수 있고 균일한 조건의 반복실험을 가능하게 하여 시험의 질을 대폭 향상시킬 수 있는 장점이 있다. HIL방법을 ABS 시뮬레이션에 적용하기 위해서는 일반적으로 소프트웨어인 차량동역학 모델, 실시간으로 시뮬레이션을 수행하기 위한 컴퓨터 및 ABS 제어장치와 같은 하드웨어가 요구되는데 ABS 시뮬레이터 제작 초기에는 수퍼컴퓨터가 이용되기도 하였다. Deborah[1] 등은 DEC VAX station II에 5자유도의 차량모델을 이용한 실시간 시뮬레이터를 개발하였는데 전기, 전자기술의 적용 초기였으므로 장치가 매우 복잡하고 고가였다. 90년대에 들어서면서 전자기술의 발달과 더불어 Helmut[2]등은 VAX 컴퓨터보다 훨씬 작은 크기의 컴퓨터인 트랜스퓨터를 이용하여 실시간 시뮬레이터를 개발하였으며 Larry[3]는 실시간 시뮬레이터에 적용할 수 있는 17자유도의 차량동역학모델을 포함한 프로그램을 개발하였다. 또한 Sailer와 Essers[4]는 트랜스퓨터를 이용하여 3차원 동역학 비선형 해석을 할 수 있는 실시간 시뮬레이터를 개발하였다.

최근 들어서는 개인용 컴퓨터의 급격한 발달로 인하여 저가의 개인용 컴퓨터를 이용하여 실시간 시뮬레이션을 수행할 수 있게 되었다. Bach등[5]은 개인용 컴퓨터를 이용하여 차량의 동적 특성을 3차원으로 해석할 수 있는 일명 "로드러너(Roadrunner)"라는 실시간 시뮬레이터를 구성하였다. 그러나 여러 개의 마이크로 프로세서와 확장카드를 사용함으로써 제작과정이 번거롭고 제작비용이 많이 소요되었다.

본 연구에서는 ABS제어 로직 개발, ECU 및 유압장치 분석을 위한 경제적 규모의 실시간 ABS 시뮬레이터를 개발하고자 한다. 개인용 컴퓨터를 기본으로 수치적인 차량 및 타이어 모델을 포함하는 시뮬레이션 과정 속에 실제 유압장치를 전체 시뮬레이션의 한 서브루틴으로 사용하여 실시간 시뮬레이션을 수행함으로써 개발한

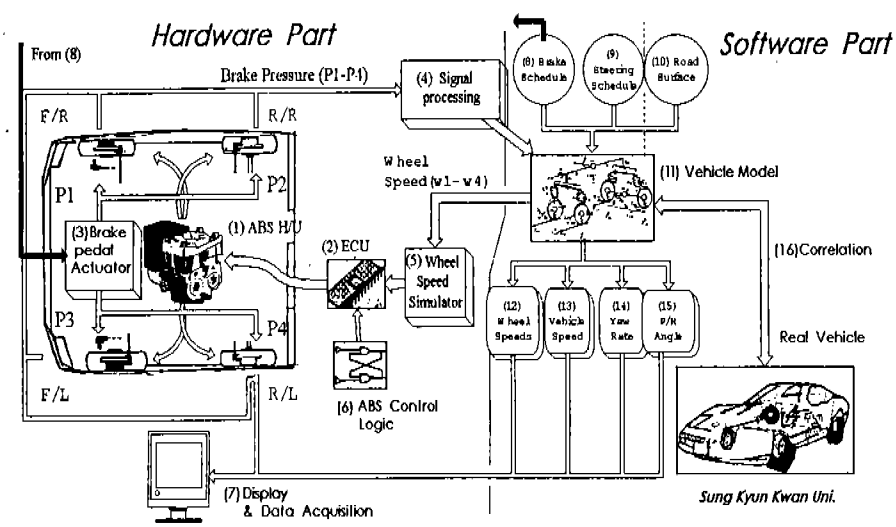


Fig.1 Schematic diagram of ABS simulator

제어로직의 검증과 ECU 및 유압장치의 특성을 분석한다.

2. ABS 시뮬레이터 구성

ABS시뮬레이터는 HIL방법을 적용하여 구성하였으며 차량 및 타이어모델을 포함한 소프트웨어 프로그램 속에 실제 브레이크 유압장치와 ABS 제어장치를 서브루틴으로 사용하였다.

Fig.1은 ABS시뮬레이터의 구성을 나타낸 것으로써 하드웨어부, 소프트웨어부 및 하드웨어부와 소프트웨어부 사이의 입출력부로 구성된다. 하드웨어부는 실차의 브레이크 장치(coventional brake system : CBS), 유압 장치(hydrauric control unit : HCU), ABS 전자제어장치(electronic control unit : ECU), 페달 답력을 모사하기 위한 브레이크 액츄에이터(brake actuator), 신호처리장치, 차륜속도 시뮬레이터(wheel speed simulator), 디스플레이 장치(display unit)로 구성된다. 소프웨어부는 차량동역학 모델과 다양한 시나리오를 포함하고 있는 브레이크 스케쥴, 스티어링 스케쥴, 노면 조건 등으로 구성된다. 입출력부는 하드웨어부와 소프트웨어부를 연결시켜주는 A/D 및 D/A 컨버터, 주컴퓨터에서 계산된 자료와 계측 데이터를 디스플레이용 컴퓨터로 전송하는 데이터 통신장치로 구성된다. 본 장에서는 시뮬레이터의 구성을 각 항목별로 설명하고 시뮬레이션의 수행 방법에 관하여 서술하고자 한다.

2.1 하드웨어부

ABS 시뮬레이터 하드웨어부의 구성을 Fig.2에 나타내었다. 하드웨어부는 일반 브레이크 시스템(CBS), ABS, 공압장치, 압력센서, ABS 관련배선 등으로 구성되었다. 일반 브레이크 시스템은 1800cc급 승용차의 기존 부품을 사용하였으며 캘리퍼와 디스크, 실제길이의 유압관, 부스터, 마스터실린더, 비례감압 밸브(proportioning valve) 등으로 구성된다. 4개 차륜의 디스크는 사각 틀에 고정되어 있고 유압이 가해지면 캘리퍼를 움직인다.

(1) 유압장치(HCU)

일반 브레이크 시스템은 운전자의 페달답력을 부스터에서 증가시킨 후 마스터실린더를 통하여 차륜실린더의 압력을 상승시킨다. 본 연구에서 사용된 제동용 배관은 차량의 안전사고를 예방하기 위해 마스터실린더에서 두 개의 독립된 압력이 나오도록 구성되어 있으며 대각선방향으로 차륜을 제동하는 X자 배관형태를 취하고 있다.

ABS 유압장치는 기존의 브레이크장치에 추가 장착하는 add-on방식이 주로 사용되고, 마스터 실린더의 출력단과 각 차륜 실린더의 입력단 사이에 장착됨으로써 각 브레이크 실린더의 압력을 증가, 감소 혹은 유지하는 목적으로 사용된다. 유압장치는 압력을 제어하는 각 채널당 1개의 솔레노이드 밸브(solenoid valve)와 플로우 콘트롤 밸브(flow control valve)를 사용하는 sol-flow방식과 각 채널당 2개의 솔레노이드 밸브를 사용하는 sol-sol 타입으로 나누어진다.

Fig.3은 sol-flow방식의 ABS유압장치 회로를 나타낸 것으로써 CBS, ABS 유압장치의 회로와 본 연구를 위해 장착되는 압력센서의 위치를 나타내었다. 마스터 실린더에서 가해진 압력은 X자배관 형태로 전달되며 후륜실린더의 유압은 프로포셔닝밸브(proportioning valve)를 통하여 가해진다. ABS 유압장치인 플로우콘트롤 밸브와 솔레노이드밸브는 CBS의 유압배관에 부착되었다. 또한 모터펌프와 체임버는 솔레노이

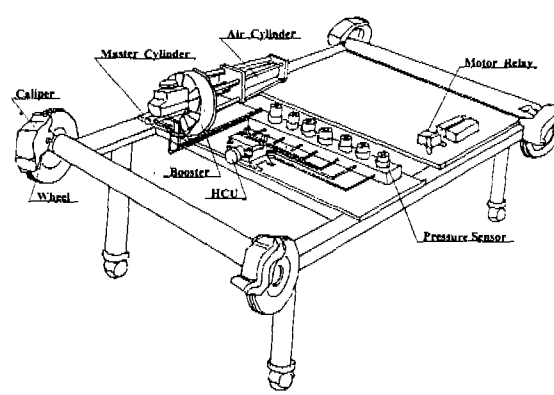


Fig.2 Hardware part of the ABS simulator

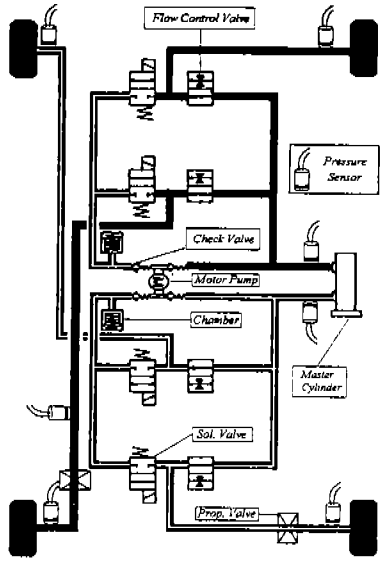


Fig.3 Typical form of sol-flow type

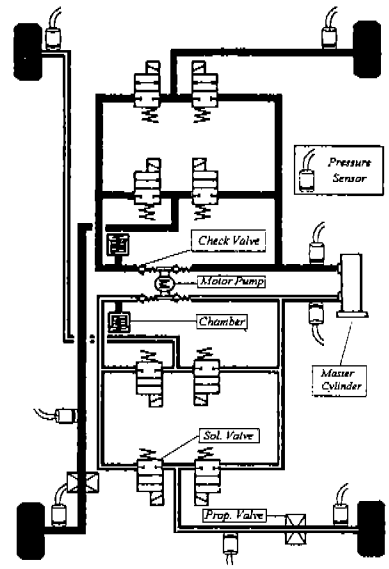


Fig.4 Typical form of sol-sol type

드밸브 출력단과 마스터실린더 사이에 부착되었고 차륜실린더로부터 유입된 유량을 마스터실린더로 되돌리는 역할을 한다.

ABS유압장치는 차륜별 독립제어를 수행할 경우 차륜의 잠김이 발생할 때만 동작한다. 제동시 차륜실린더의 압력이 증가하여 마찰력보다 제동력이 커지면 차륜의 잠김이 발생한다. 이 때 차륜의 속도를 회복하기 위해 유압장치의 솔레노이드 밸브를 열어 감압을 수행하며, 감압시 차륜실린더로부터 흘러나온 유량은 모터펌프에 의하여 체임버(chamber)로 보내진 후 마스터 실린더로 되돌려 진다. 플로우 콘트롤 밸브는 차륜실린더 입구 압력의 상승 기울기를 일정하게 유지하는 역할을 수행하지만 마스터실린더의 압력을 차단하는 역할은 하지 못한다.

Fig.4는 sol-sol 방식의 ABS유압장치 회로를 나타낸 것으로써 일반 브레이크장치와 ABS 유압장치의 회로구성과 본 연구를 위해 장착되는 압력센서의 위치를 나타내었다. sol-sol방식은 sol-flow방식에서 플로우 콘트롤 밸브를 솔레노이드 밸브로 대체한 것으로써 차륜실린더의 감압 및 압력유지 모드에서의 마스터실린더의 유량을 차단할 수 있다. sol-sol방식의 가장 큰 장점은 두 개의 솔레노이드 밸브를 작동함으로써 보다 확실히 구분되는 감압, 유지, 증압의 3가지 제어모드를 수행하는 것이다. sol-sol 방식의 증·감압은 인렛(inlet)솔레노이드 밸브와 아웃렛(outlet)솔레노이드 밸브를 조절하여 수행된다. 증압은 인렛 솔레노이드 밸브를 열고 아웃렛 솔레노이드 밸브를 닫은 상태에서 수행된다. 또한 압력의 유지는 인렛(inlet) 솔레노이드 밸브를 닫아 마스터 실린더의 압력을 차단함으로써 수행되며 감압은 인렛 솔레노이드 밸브를 닫고 아웃렛(outlet) 솔레노이드 밸브를 열어 수행된다.

본 연구의 시뮬레이터는 sol-flow 방식과 sol-sol 방식 모두를 장착하여 실험할 수 있고 유압장치의 특성 또한 분석할 수 있도록 설계되었다.

(2) ECU

본 연구의 시뮬레이터는 연구자가 조정할 수 있도록 개발된 제어로직(이하 PC Logic)을 이용한 시뮬레이션과 연구자가 조정할 수 없는 블랙박스의 상용 ECU를 이용한 시뮬레이션이 가능하도록 설계되었다. PC 로직을 이용한 시뮬레이션은 PC에서 릴레이제어회로를 이용하여 유압장치를 직접 제어함으로써 수행되며 상용 ECU

를 이용한 시뮬레이션은 차량모델에 의하여 계산된 차륜속도를 차륜속도 시뮬레이터를 이용하여 상용 ECU에 입력함으로써 수행된다. PC로직을 이용한 시뮬레이션에서는 사용자가 직접 유압장치를 제어할 수 있고 상용 ECU를 이용한 시뮬레이션에서는 상용 ECU의 평가와 제어로직 분석이 가능하다.

(3) 브레이크 페달 액츄에이터

실제 차량의 ABS제어시 운전자는 계속해서 브레이크 페달을 밟고 있는데 이러한 과정을 모사하기 위해 공압 실린더를 이용하였다. 공압실린더로 마스터 실린더에 하중을 가함으로써 실제 브레이크력을 모사하도록 하였다. 공압실린더는 별도의 솔레노이드 밸브에 의해 작동되며 공압실린더에서 브레이크 페달에 가해진 압력은 부스터의 진공펌프에 의해 높아지고 마스터 실린더의 압력을 상승시킨다. 공압을 가한 상태에서 부스터를 작동시키지 않았을 때 마스터 실린더의 최대압력은 140kg/cm^{2}이고 부스터를 작동시킬 때 200kg/cm^2 이상을 유지할 수 있으므로 실제 상황의 제동과정을 모사하기에 충분하였다.

(4) 신호처리 장치

신호처리 장치는 압력센서, 앰프, 필터를 포함한다. 압력센서는 각 차륜에 걸리는 브레이크 압력과 마스터 실린더의 압력을 측정하기 위해 스트레인 게이지 형태로 총 8개를 사용하였다. 압력센서를 부착한 위치는 Fig.3과 Fig.4에 나타나 있는데 각 차륜의 실린더 입력 부에 4개를 부착하였고 마스터 실린더 출력 부에 2개를 부착하였으며 후륜의 비례감압밸브 이전에 2개를 부착하였다. 압력센서에 의하여 측정된 신호는 증폭기와 필터를 통과한 후 A/D컨버터를 통하여 PC에 입력된다. 증폭기와 필터는 OP-Amp를 이용하여 구성하는데 증폭기 출력 단의 이득(gain)은 60dB이고 필터는 20Hz의 차단주파수를 갖는 Butterworth형 저역통과형이다. 필터의 감쇠기울기는 -24dB/oct이고 차단주파수는 진폭이 -3dB되는 점에서 설정하였으며 증폭기와 필터를 포함하는 자체잡음은 1mV이하였다.

(5) 차륜속도 시뮬레이터

본 연구의 차륜속도 시뮬레이터는 상용 ECU로직해석을 수행하기 위해 제작한 소프트웨어에 의해 제어되는 하드웨어 보드로써 4개 차륜의 속도를 실험자가 원하는 대로 ECU에 입력할 수 있도록 고안하였다. 차륜속도 시뮬레이터는 ECU의 고장진단을 고려하여 출력저항을 임의로 변환할 수 있도록 가변저항을 포함하고 있으며 시간에 따라 주파수와 진폭을 동시에 프로그래밍할 수 있도록 설계되었다. 차륜속도 시뮬레이터는 차량의 동역학 모델에서 계산된 차륜속도를 아나로그 신호로 변환하여 ECU에 입력하는 역할을 한다. 차륜속도를 나타내는 신호의 정현파 주파수는 센서 링의 잇수와 차량의 타이어 반경으로부터 계산되므로 차량마다 다르다.

(6) ABS 제어로직

ABS 제어로직은 상용 ECU에 내장되어 있는 로직으로써 각 차륜의 속도를 입력받아 차체의 속도와 차량의 상태를 판단하여 유압장치를 제어하는 로직이다. ABS 제어로직은 상품별 특성, 유압장치의 특성, 차량 제원을 고려하여 구성되므로 생산 회사마다 차이가 있고 차량마다 다르게 구성된다. ABS 시뮬레이터를 이용하면 상용 ECU의 제어로직과 특성을 분석할 수 있으며 관련된 유압장치의 성능도 분석할 수 있다.

(7) 디스플레이 장치

본 연구의 디스플레이 장치는 입·출력 변수를 그래프로 나타내는 것과 차량의 상태를 그림으로 나타내는 것이 있다. Fig.5는 입·출력 변수를 나타내는 그래프로써 ABS 시뮬레이션의 수행과 함께 실시간으로 출력되어 실험자가 실시간으로 데이터를 확인할 수 있다. 데이터 화면은 4개의 그래프로 구성되는데 차체속도와 각 차륜의 속도를 나타내는 그래프, 각 차륜 및 마스터 실린더의 압력을 나타내는 그래프, 각 차륜의 슬립율을 나타내는 그래프 및 각 차륜의 마찰력을 나타내는 그래프로 구성된다.

Fig.6은 차체의 속도를 시각적으로 보여주는 데모 화면을 나타낸 것으로써 차량의 동역학 모델로부터 차체속도를 입력받아 실시간으로 차량의 거동을 나타낸다. 또한 청각효과를 나타내기 위해 엔진소리와 브레이크 소리를 추가하였는데 차량의 속도가 증가함에 따라 엔진소리의 주파

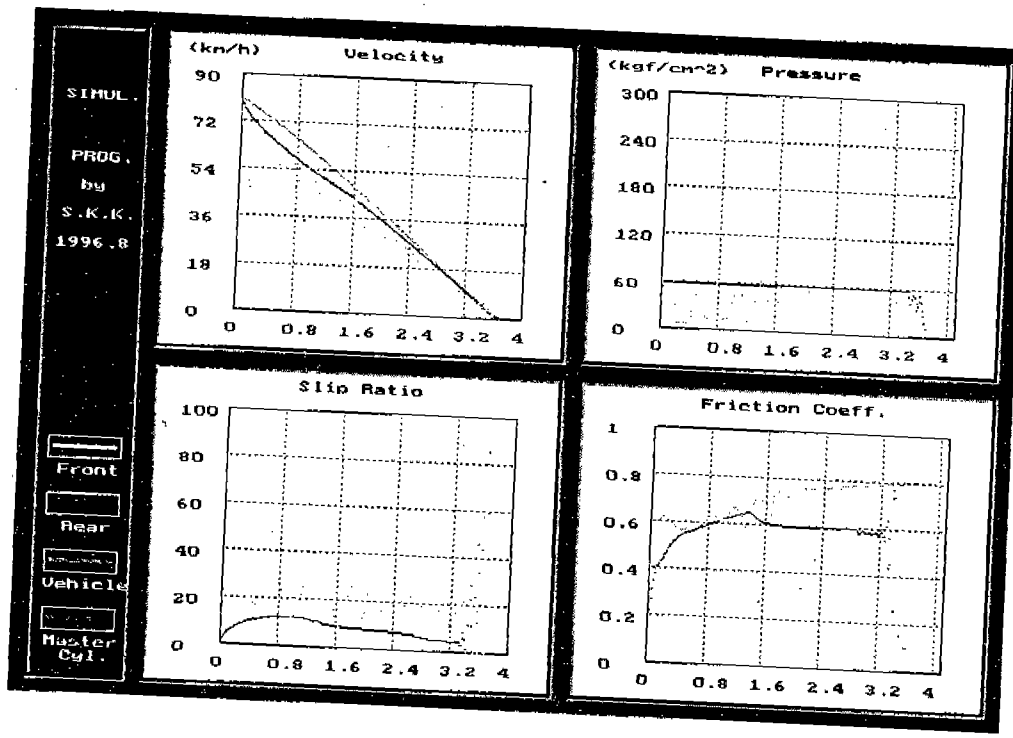


Fig.5 Display of ABS simulation

Fig.6 Display of vehicle

수와 진폭이 커지도록 하여 차량의 속도를 구별할 수 있도록 하였고 제동시 10km/h이하의 속도에선 "끼이익"하는 마찰음이 발생하여 차량정지를 판단할 수 있도록 하였다.

2.2 소프트웨어부

ABS 시뮬레이터의 소프트웨어부는 운전조건 데이터, 차량동역학 모델 및 입출력 데이터로 구성된다.

(1) 브레이크 스케줄

브레이크 스케줄은 차량이 시동을 걸고 출발을 해서 일정속도에 도달했을 때 브레이크를 밟았음을 모사 하거나 압력의 증압기울기를 높이고 낮추는 등 운전자가 실차에서 브레이크를 밟는 과정을 모사 하는 것이다.

(2) 스티어링 스케줄

스티어링 스케줄은 차량이 곡선 주행로를 선회할 때 핸들을 돌리거나 제동시 차량이 원하지 않는 방향으로 회전을 할 때 운전자의 반응을 모사 하는 것으로써 여지환[6]의 운전자 모델이 포함되어 있다.

(3) 노면 조건

노면 조건은 아스팔트길, 빗길, 눈길 등의 노면을 타이어와 노면바닥 사이의 마찰계수를 이용하여 모사 한다. 아스팔트길과 같은 노면은 고마찰노면(High-μ), 빗길과 같은 노면은 중 마찰노면(medium-μ), 눈길과 같은 노면은 저 마찰노면(low-μ)이다. 특히 차륜의 왼쪽과 오른

쪽의 마찰계수가 다른 노면은 비대칭 혹은 스플릿 마찰노면(split-μ)이고 차량의 제동중 마찰계수가 바뀌는 노면은 점프 마찰노면(jump-μ)이다.

(4) 차량동역학 모델

차량의 동특성을 해석하기 위해 여[6]에 의해 개발된 종방향, 횡방향 및 요우방향 운동을 포함하는 차량동역학 모델을 사용하였다. 이 모델은 제동시 감속에 의해 전륜과 후륜에 걸리는 하중이동과 스티어링시에 발생하는 좌우의 하중이동을 고려하였으며 현가계는 고려하지 않았다. 종방향운동은 타이어에서 발생하는 차체의 종방향 힘성분과 공기저항력을 이용하여 계산하였고 횡방향운동은 타이어에서 발생하는 차체의 횡방향 힘성분과 공기저항력을 이용하여 계산하였다. 요우잉운동은 질량관성모멘트, 종방향성분의 힘 및 횡방향성분의 힘의 평형관계로 부터 차체의 무게중심에서 발생되는 모멘트를 이용하여 산출하였다. 타이어모델은 차량의 비선형성을 증가시키는 가장 중요한 인자들 중 하나인데 본 연구에서는 타이어와 지면사이의 마찰력을 슬립율과 슬립각으로 표현하는 Dugoff[6]의 모델을 이용하였다.

차량의 상태를 판단하는 변수로는 슬립율과 차륜가속도가 있으며 슬립율은 차체속도와 차륜속도를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\text{슬립율} = \frac{\text{차체속도} - \text{차륜속도}}{\text{차체속도}} \times 100(\%) \quad (1)$$

슬립율은 ABS제어의 가장 중요한 변수로써 조향성을 향상시키고 제동기능을 향상시키는 기준으로 사용되며 차륜가속도는 노면을 판단하는 기준으로 사용된다. 상용 ECU에 사용되는 알고리즘은 통상 슬립율과 가속도를 혼합한 제어방식을 사용한다. 이러한 제어형태에 대한 제동시 차량의 동력학적 변화를 차량 동역학 모델을 통하여 ECU에 입력되도록 구성하였다.

2.3 실시간 ABS 시뮬레이터 작동원리

실험자가 초기조건(노면조건, 스티어링스케쥴, 브레이크스케쥴 등)을 설정하고 차량의 속도를 설정속도까지 증가시킨 후 브레이크 스케쥴에 의해 공압실린더를 통한 마스터실린더의 압력을 상승시킴으로써 시뮬레이터는 작동된다. 마스터실린더로부터 브레이크 실린더로 전달된 압력은 각 바퀴의 브레이크 관에 부착된 압력센서에 의해 측정되며, 측정된 압력은 AD변환기를 거쳐 숫자로 차량모델에 입력된다. 차량모델은 각 차륜의 브레이크압력으로부터 주행중인 자동차의 각 차륜에 제동토크가 가해진 것으로 하여 차량동역학계산을 수행한다(여지환[6]연구 참조). 이 해석으로부터 계산된 각 차륜의 속도는 차륜속도 시뮬레이터를 통하여 차륜속도센서의 신호로 변환되어 상용 ECU에 입력된다. 상용 ECU는 입력된 차륜속도에 근거하여 각 차륜의 브레이크압력을 조절하며 이 새로운 압력은 다시 숫자로 변환되어 차량모델로 입력되는 반복과정을 거친다. 상용 ECU가 아닌 PC를 사용할 경우에는 실험자가 제작한 ABS제어로직으로 ABS제어가 수행된다.

3. 실시간 ABS 시뮬레이션 방법

본 연구의 ABS 실시간 시뮬레이션에는 상용 ECU를 이용하는 방법과 본 연구에서 개발한 PC 로직을 이용하는 방법이 있다. 시뮬레이션에 적용된 차량의 제원은 Table 1과 같으며 일반 브레이크 장치는 1800cc급 승용차의 브레이크 장치를 사용하였다. ABS의 부품은 2000cc급 승용차의 것을 사용하였는데 유압장치의 형태는 sol-sol 타입이고 이에 맞게 개발된 상용 ECU를 사용하였다. 본 장에서는 ECU 로직과 PC로

Table 1 Vehicle Parameter

Vehicle Mass	1298kg
Vehicle Inertia	1627kgm2
Vehicle Hight (to mass center)	0.533m
Wheel Base	2.454m
Wheel Radius	0.305m
Wheel Inertia	2.23kgm2

직을 이용한 시뮬레이션 수행 적용예에 관하여 서술한다.

3.1 상용 ECU 를 이용한 시뮬레이션

상용 ECU 로직을 이용할 때는 실제 차량상태의 ABS 배선을 구성하는 것이 필요하다. ECU는 ABS의 HCU 제어로직 외에 진단로직을 포함하고 있는데 안전부품인 제동장치의 특성상 진단로직은 매우 까다롭다. 기본진단 항목으로는 각 배선의 단락, 저항검사, 배터리 전압검사 등이 있고 운전중 진단항목으로 모터 펌프검사, 에어 갭 불량검사, 차륜속도 점프검사 등이 있다. ABS 시뮬레이션 수행중 ECU의 감압혹은 증압 수행 시기와 차량 모델에서 차륜속도를 입력하는 시기가 일치하지 않아도 ECU의 진단 로직에 걸려 시뮬레이션이 중단되며 이 밖에도 감속도의 폭이 너무 클 때에도 진단 로직에 걸리게 된다. 상용 ECU의 ABS시뮬레이션의 과정을 서술하면 다음과 같다.

(1) 노면 조건(Low-μ, Medium-μ, High-μ, Split-μ), 브레이크 스케줄, 조향 스케줄, ABS의 제동 조건 등의 초기조건을 설정한다.

(2) 전원을 켠다. 전원은 12V의 자동차용 배터리를 이용하였으며 전원을 켜는 것은 차량의 시동을 거는 것을 모사 하는 것이다. ECU는 상품마다 차이가 있으나 기본 진단하는 시간은 3초 내이다.

(3) 차륜속도 시뮬레이터를 이용하여 차륜속도를 증가시키는데 본 연구에서 사용된 ECU는 차륜속도 6~7km/h에서 모터 전압과 모터펌프 검사를 수행한다. 차량의 속도를 상승시킨 후 일정속도를 유지한다.

(4) 공압실린더가 마스터 실린더의 압력을 상승시킴으로써 브레이크 밟는 것을 모사 한다.

(5) 압력센서가 4바퀴의 상승된 압력을 측정하고 측정된 압력은 차량동역학 모델에 입력되어 4바퀴의 새로운 차륜속도가 산출된다.

(6) 산출된 차륜속도는 차륜속도 시뮬레이터를 이용하여 실제자동차의 차륜속도신호와 유사한 형태의 신호로 ECU에 입력되고 ECU는 입력된 신호로부터 ABS 제어를 수행한다.

ABS 시뮬레이션은 (5)~(6)과정을 차속이 0km/h가 될 때까지 반복한다. 또한 차량 동적 거동을 나타내는 변수인 차체속도, 차륜속도, 차륜 실린더의 압력 및 슬립율과 차량의 자세를 그래픽으로 보여주는 차량 디스플레이는 실시간으로 출력되고 각 변수 값들은 컴퓨터의 메모리에 저장된다.

3.2 PC Logic을 이용한 시뮬레이션

PC 로직을 이용하는 방법은 상용 ECU대신 본 연구에서 개발한 제어로직을 이용하여 시뮬레이션을 수행하는 방법이다.

ABS의 제어기준에 따라 슬립율 제어, 가속도 제어 및 슬립율과 가속도를 통합한 제어방법이 있으며 ABS시뮬레이션을 수행하는 방법은 다음과 같다.

(1) 초기 조건을 설정한다.

(2) 일정속도에 도달한 후 공압장치를 이용하여 브레이크 압력을 상승시킨다.

(3) 각 차륜의 압력은 차량동역학 모델에 입력되어 각 바퀴의 차륜속도와 슬립율과 차륜 가속도등이 산출되며, 각 차륜실린더 압력의 증가, 감소 및 유지 등의 압력모드가 PC Logic에 의해 판단된다.

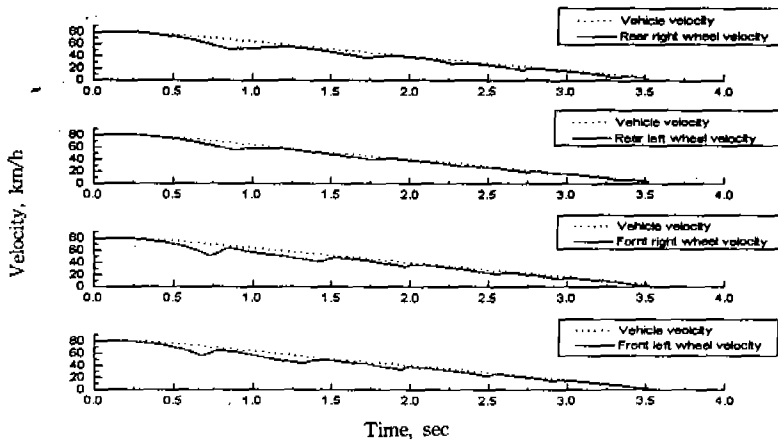
(4) 판단된 압력모드가 되도록 유압장치의 솔레노이드 밸브가 제어된다. 각 차륜의 압력은 다시 측정되어 (3)의 과정으로 반복된다.

차량 변수인 차체속도, 차륜속도, 차륜 실린더의 압력 및 슬립율과 차량의 디스플레이는 실시간으로 출력하고 차체속도가 0km/h이 될 때까지 시뮬레이션을 수행한다.

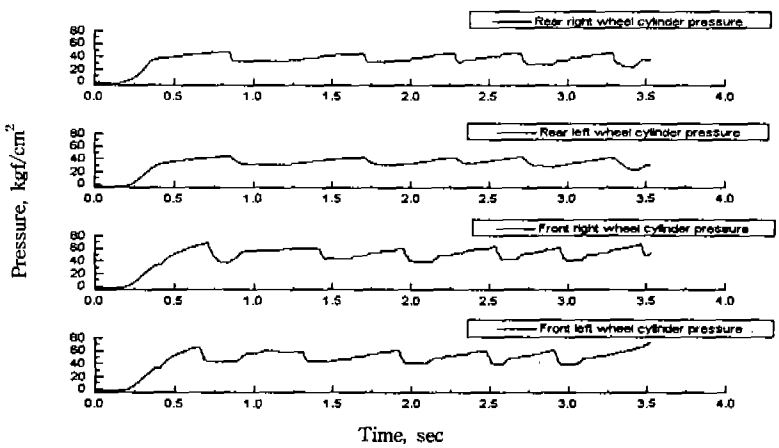
4. 실시간 ABS시뮬레이터의 적용

실제 차량의 상용 ECU를 이용하여 실시간 시뮬레이션을 수행하였다. 노면을 고마찰노면, 저마찰노면 및 비대칭노면(Split-μ)으로 설정하고 각 노면에서 제동개시 차체속도를 80km/h로 유지한 후 실행하였다.

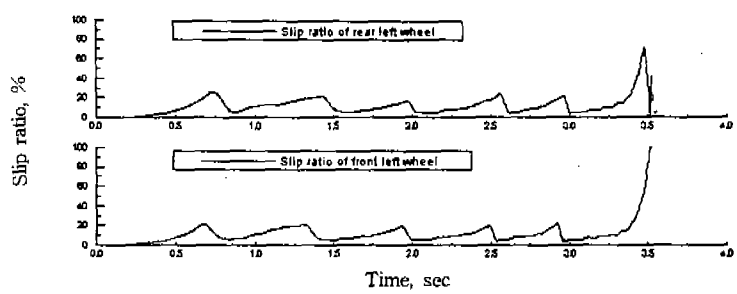
상용 ECU를 이용한 시뮬레이션은 586급 컴퓨터 이상의 기종에서 실시간 시뮬레이션이 가



(a) Velocity vs. time

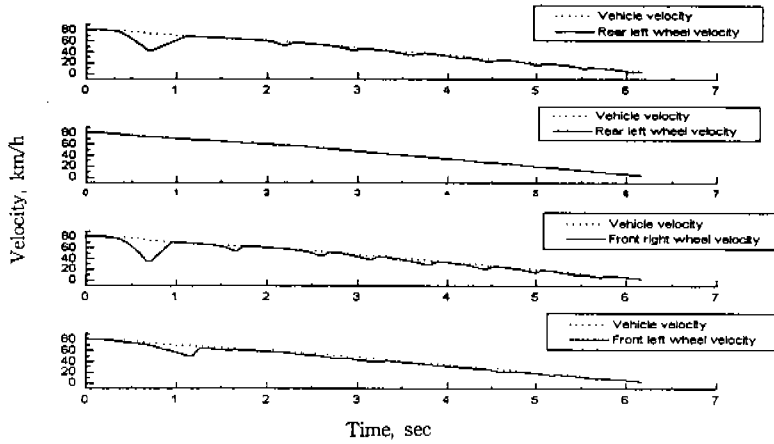


(b) Pressure vs. time

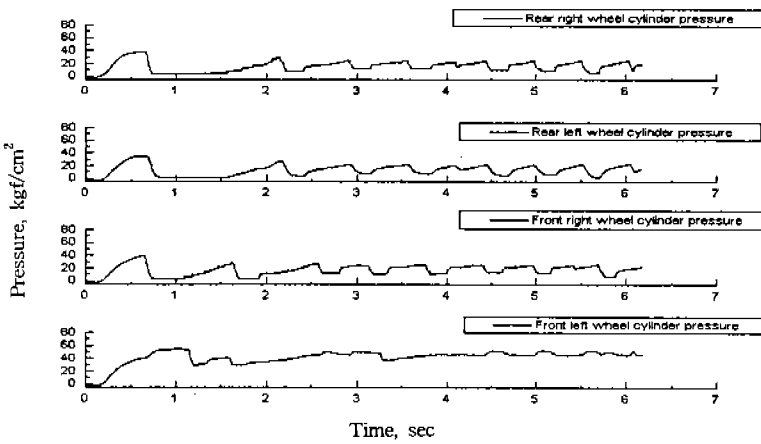


(c) Slip ratio vs. time

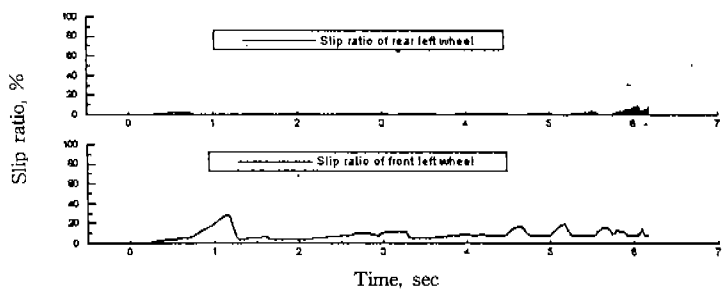
Fig.7 Test result of commercial ECU logic(High-μ)



(a) Velocity vs. time

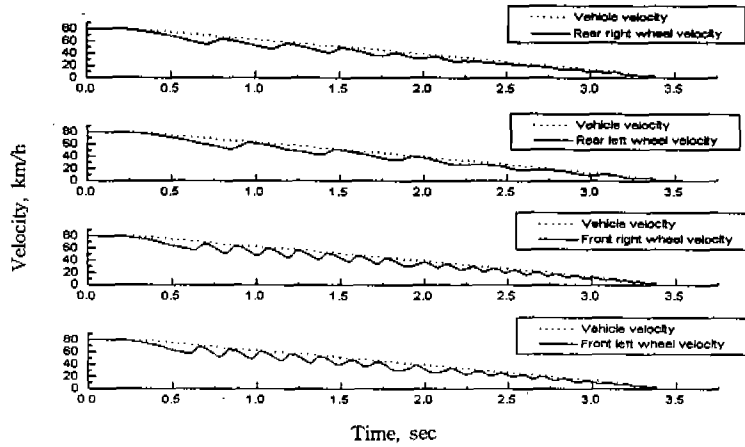


(b) Pressure vs. time

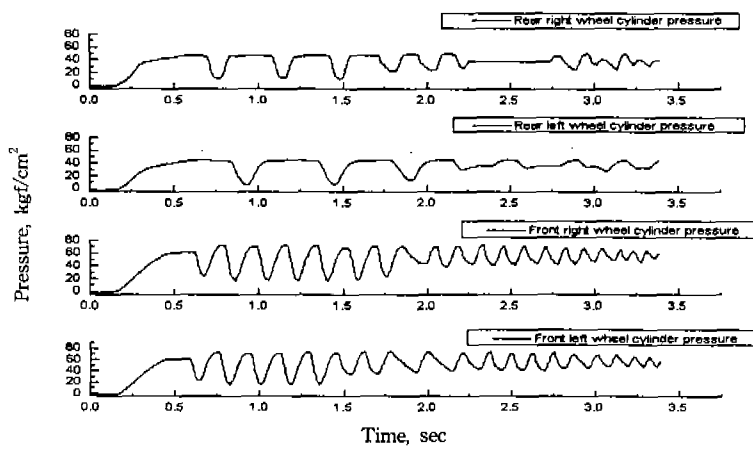


(c) Slip ratio vs. time

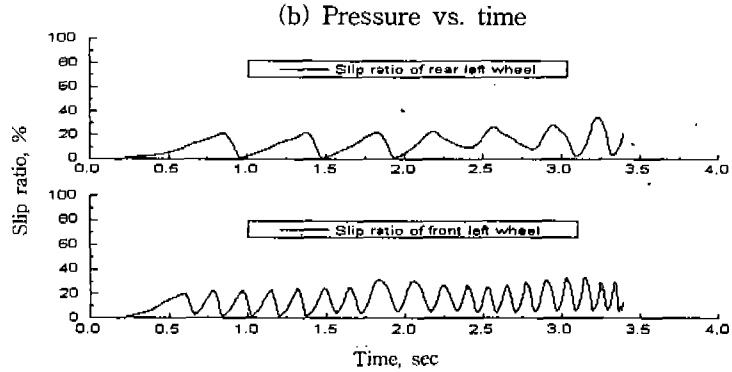
Fig.8 Test result of commercial ECU logic(Split-μ)



(a) Velocity vs. time



(b) Pressure vs. time



(c) Slip ratio vs. time

Fig.9 Test result of PC logic (High-μ)

능한 것으로 분석되어 586급 컴퓨터를 사용하였다. 실시간 시뮬레이션을 수행하기 위해 컴퓨터의 차량동역학 모델에서 계산된 차륜속도를 ECU에 출력하는 주기는 상용 ECU의 내부 로직 순환 주기보다 짧아야 한다. 상용 ECU는 4개 차륜의 속도를 측정하여 유압장치의 솔레노이드 밸브 작동여부를 판단하는데 차륜속도를 측정하는 주기는 10ms로 측정되었다. 486급 컴퓨터에서 차량동역학 해석과 입출력 장치를 구동하는데 소요되는 주기는 50ms였으므로 상용 ECU의 내부 로직 순환 주기보다 길다. 586급 컴퓨터에서의 순환주기는 4ms로써 상용 ECU의 순환주기보다 2.5배 짧으므로 실시간 시뮬레이션을 수행하기에 적합했다.

PC 로직을 이용한 시뮬레이션의 경우 고마찰노면에 대한 것만을 이 논문에 실었다. ABS 제어변수는 슬립율로 설정하였고, 슬립율이 20%이상일 때 감압, 슬립률이 10%이하일 때 증압, 슬립율이 10%~20%일 때 압력유지를 수행하도록 하였다.

4.1 상용 ECU를 이용한 실험결과

Fig.7은 상용 ECU를 이용한 시뮬레이션 결과로써 고마찰노면의 경우 80km/h에서 제동한 결과이다. Fig.7(a)는 후륜우측, 후륜좌측, 전륜우측, 전륜좌측의 차륜속도와 차체속도를 나타낸 것이며, Fig7(b)는 각 차륜실린더 압력을 나타낸 것이다. 또한 Fig.7(c)는 후륜좌측, 전륜좌측의 슬립율을 나타낸 것이다.

차륜 속도가 80km/h를 유지하다 0.3초후에 차륜 실린더 압력이 증가하자 차륜 속도가 급격히 낮아지며 ECU는 감압을 수행하고 있다. 압력의 감압기울기는 급격하며 일정 압력을 유지한 후에 다시 증압을 수행하였다. 증압의 형태는 계단식이었고 제어를 수행하면서 전륜의 압력은 40~60kg/mm^{2}에서 유지되었고 후륜의 압력은 30~45kg/mm^2 에서 유지되었다. 전체 제동시간은 압력이 증압 되는 시점에서 부터 차륜속도가 0km/h가 되는 시점까지 3.2초였다. 차체속도가 10km/h부근에 도달하였을 때 압력을 증가시켜 슬립율이 크게 증가되는데 본 연구에서 사용한 ECU 에서는 저속(약10km/h이하)에서 ABS 제어를 수행하지 않고 무조건 증압 하여 차체속도를 0km/h로 되도록 하는 것이 확인되었다.

우측차륜의 노면은 저 마찰 노면이고 좌측차륜의 노면은 고마찰노면인 비대칭노면의 경우, 80km/h에서 제동한 결과를 Fig.8에 나타내었다. 실험결과로부터 제어방식이 전륜의 경우 독립제어이고 후륜의 경우 select-low 방식임을 확인할 수 있었다. 차륜 실린더 압력곡선에서 전륜의 압력은 각각 독립적으로 증감압되고 있으나 후륜의 압력은 저마찰노면의 압력을 기준으로 동일하게 증감압 되었다. 차량의 주행안정성을 확보하기 위해 후륜의 압력제어방식은 select-low로 전륜의 제어방식은 독립제어로 하였는데 이는 여지환[6]의 연구에서 가장 이상적인 것으로 밝혀진 제어체계이다. 본 연구에서 사용한 ECU는 슬립율 10%를 기준으로 제어를 수행하였고 증압의 형태는 계단식이었다.

4.2 PC 로직을 이용한 실험 결과

Fig.9은 PC 로직을 이용한 시뮬레이션 결과로써 고마찰노면에서 슬립율 제어를 수행한 결과이다. 제동을 시작하여 전륜의 압력이 60kg/㎟에 도달하였을 때 압력을 유지하고 있으며 슬립율이 20%이상 되는 시점에서 감압을 수행하였고 슬립율이 10%이하가 되었을 때 증압을 수행하였다. 압력의 유지모드가 오래 나타나는 이유는 슬립율이 10%~20%에서 유지되기 때문이다. 슬립율은 설정한 데로 10~20%에서 유지되었고 4개 차륜의 실린더 압력 역시 프로그램된 바대로 독립적으로 제어되었다.

4.3 시뮬레이션 결과의 고찰

본 연구에서 개발된 ABS HIL시뮬레이션을 이용하여 상용 ECU로직을 파악할 수 있었으며 본 연구에서 개발한 간단한 PC로직을 구현할 수 있었다. 상용 ECU로직의 계단식 증압형태는 캘리퍼와 브레이크 디스크 사이의 공진 현상 및 브레이크의 히스테리시스 현상을 고려한 것이다. 고마찰노면에서 ECU로직과 PC로직의 제동시간

은 차륜실린더 압력제어 형태의 차이에도 불구하고 비슷한데 ECU로직의 계단식 증압형태는 보다 안정적인 제동특성을 얻기 위한 것이기 때문이다. 또한 계단식 증압형태에서 초기증압시 차륜실린더 압력의 증가폭이 크게 설정된 것은 브레이크 패드의 비선형적 탄성으로 인하여 가해진 압력만큼 브레이크의 제동토크가 발생하지 않기 때문이다. 브레이크 히스테리시스 현상은 증감압시 차륜실린더의 압력과 브레이크 제동토크의 비선형성 때문에 발생하는 것인데 상용 ECU로직에 고려된 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

최근 들어 차량 성능의 최적화를 위해 슈퍼컴과 마이크로 프로세서를 이용한 다양한 차량시험방법이 개발되고 있다. 본 연구에서는 개인용 컴퓨터를 이용하여 경제적인 규모로 ABS의 실시간 시뮬레이션이 가능하도록 하였다. 개발된 ABS 시뮬레이터는 실시간 시뮬레이션방법의 하나인 HIL방법을 이용하였으며 상용 ECU분석을 수행할 수 있었다. 또한 PC 로직부분에서는 연구자가 조절 가능한 로직을 구현하고 검증할 수 있었다. 개발된 시뮬레이터는 제동제어로직의 개발 외에 진단로직의 개발에도 유용될 수 있으며 차량동역학 모델과 하드웨어의 보완을 통하여 향후 TCS(traction control system)와 VDC (vehicle dynamic control)와 같은 첨단 차량제어 시스템개발에도 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비지원으로 이루어 진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Deborah Kempf, Loren Bonderson, Loren Slafer, "Real Time Simulation for Application to ABS Development", SAE Paper 870336.
2. Helmut Fennel, Sascha Mahr, and Rudiger Schleysing, "Transputer-Based Real-Time Simulator- A High Performance Tool for ABS and TCS Development", SAE Paper 920643.
3. Larry Michales, "The use of a Graphical Modeling Environment for Real-Time Hardware- in-the-Loop Simulation of Automotive ABS Systems", SAE Paper 930507.
4. Ulrich Sailer, Ulf Essers, "Real Time Simulation of Trucks for Hardware-in-the-Loop Applications", SAE Paper 942297.
5. Th.Bach, H.Schmitt, W.Schwanke, H.J. Tumbrink, ""Roadrunner"-Real Time Simulation in Anti-lock Brake System Development", SAE Paper 950758.
6. 여지환, "ABS장착 차량의 제동특성에 관한 연구", 성균관대학교 석사학위 논문, 1996.