

자동차 공기현가 공압회로 해석 및 대체회로 설계

Analysis and Alternative Circuit Design of Pneumatic Circuit for An Automotive Air Suspension

이 재 천
J. C. Lee

Key Words : Air Suspension(공기현가), Air Spring(공기스프링), Vehicle Height Control(차고제어), Effective Area(유효단면적), Co-Simulation(통합 시뮬레이션), Alternative Circuit(대체회로)

Abstract : This study presents an analytical model of the pneumatic circuit of an air suspension system to analyze the characteristics of vehicle height control. The analytical model was developed through the co-simulation of Simulink(air spring) and HyPneu(pneumatic circuit). Variant effective area of air spring and flow coefficients of pneumatic valves were estimated experimentally prior to the system test, and utilized in simulation. One-corner test apparatus was established using the components of commercial air suspension products. The results of simulation and experiment were so close that the proposed analytical model in this study was validated. However the frictional loss of conduit and heat dissipation which were ignored in this study need to be considered in future study. As an application example of proposed analytical model, an alternative pneumatic circuit of air suspension to conventional WABCO circuit was evaluated. The comparison of simulation results of WABCO circuit and alternative circuit show that proposed analytical model of co-simulation in this study is useful for the study of pneumatic system of automotive air suspension.

기호 설명

A_w : 유효단면적($A_w = \frac{\pi}{4}d_w^2$)
 C_v : 유량계수
 d : 감쇠상수
 d_w : 유효직경
 F : 작용력
 G : 비중(공기의 경우, $G = 1$)
 K_g : 변환인수(=114.5)
 h : 공기스프링 기준높이
 k : 스프링상수
 M_b, M_w : 각각 차체바디 질량과 휠 질량
 n : 폴리트로픽(polytropic) 지수
 $P, P_{at}, P_i, P_u, P_d, \Delta P$: 각각 공기스프링압력(절대압력), 대기압, 공기스프링압력(게이지압력),

상류압력, 하류압력, 차압력
 Q : 유량
 T_u : 상류의 절대온도
 t : 시간
 V, V_o : 각각 공기스프링 체적과 기준체적
 W : 중량
 x : 변위

1. 서 론

현가장치는 노면으로부터의 진동을 절연하고, 타이어와 노면 사이의 접지력을 확보하여, 자동차의 승차감과 안정성을 향상시키는 것을 주 기능으로 한다¹⁾. 현재 구미와 일본 업체를 중심으로 적용 확대되고 있는 Fig. 1의 공기현가시스템(air suspension system)은 기존 현가장치의 구성품인 코일스프링을 공기스프링으로 대체한 시스템으로서, 연속가변 댐퍼, 전자제어시스템과 더불어 낮은 스프링 상수에 의한 승차감 향상과 함께 주행조건에 따른 차고(vehicle height) 제어 기능을 제공한다²⁾. 기존의 코일 스프링

접수일 : 2008년 9월 30일
 이재천(책임저자) : 계명대학교 기계자동차공학부
 E-mail : ljcds@kmu.kr, Tel : 053-580-6720

을 적용한 차량은 차량 하중의 증감에 따라 차고의 변동이 발생하나, 공기현가장치에서는 공기스프링을 제어함으로써, 차량의 하중 조건과 주행조건에 따른 최적의 차고를 유지할 수 있다.

에어 스프링은 Fig. 2에서 보듯이 고압 공기를 채운 고무 벨로우즈(bellows)로써 공기압과 내부 체적 및 유효면적(effective area)에 의해 스프링 상수가 결정되며 차량의 하중변동에도 불구하고 고유주파수(eigenfrequency)를 거의 일정하게 유지할 수 있는 장점이 있다³⁾. 고압공기를 채운 고무벨로우즈는 압력에 따라 상·하로 움직이는 실린더와 횡단면으로 변하는 고무의 특성을 가지고 있으나 상·하 움직임에 의한 체적 변화에 비해 횡단면 변화에 의한 체적 변화는 상대적으로 작게 설계되었다. 공기스프링에 의한 차고제어 기능은 차량이 회전 시 일반스프링보다 안정한 자세를 유지할 수 있으며, 철(steel) 스프링에 비해 섬유로 보강된 고무의 특성을 통하여 노면으로부터 전달되는 고주파 진동의 절연이 매우 우수하다⁴⁾.

공기현가시스템의 공압회로(pneumatic circuit)는 공기압축기(compressor)를 중심으로 공기 건조기(air dryer), 압축공기공급용기(pressurized air supply vessel)와 압축 공기의 흐름을 제어하는 솔레노이드 밸브블록⁵⁾, 그리고 공기스프링으로 구성되며 솔레노이드 밸브블록은 체크밸브(check valve), 흡기밸브(intake valve)등의 방향제어밸브 및 스톱밸브(throttle valve)를 내장하고 있다.

이와 같은 공압시스템은 그 특성이 매우 비선형적이며 시변적(time-varying)이어서 정확한 해석에 어려움을 야기한다. 따라서 공기현가시스템의 공압회로 해석 및 설계를 진행할 수 있는 전용 해석 프로그램이 요구된다. 그러나 이제까지 대형트럭 캐빈(cabin)⁶⁾과 철도차량⁷⁾ 공기현가장치의 일부 연구를 제외하고 승용차용 공기현가시스템의 공압회로에 대한 해석모델 연구는 매우 드문 형편이다.

이에 본 연구에서는 승용차용 공기현가시스템의 차고높이 거동특성을 예측할 수 있도록, 이론적 근거를 바탕으로 공압회로 해석 모델을 제시하며 실험결과와 비교하여 그 성능을 확인하고자 한다.

또한 제시한 해석프로그램의 응용사례로서, 외국 선형개발업체의 기술평가를 회피한 공기현가시스템의 대체 공압회로를 설계하고 그 타당성을 시뮬레이션을 통해 보이려 한다.

2장에서는 먼저 공기스프링의 모델 식을 제시하고 상용 공기스프링의 유효단면적을 실험측정하였으며, 3장에서는 공압밸브들의 유량계수를 측정하였다. 4장에는 공기스프링 모델 식과 측정 데이터를 바탕으로 1-코너(1-C) 공압시스템에 대한 시뮬레이션과 실험을 통해 해석모델에 대한 타당성을 입증하였다. 그리고 5장에서는 WABCO사 상용회로를 해석한 후 대체회로를 설계하고 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

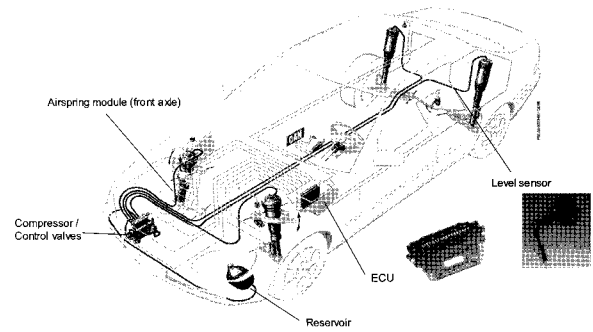


Fig. 1 Air suspension system

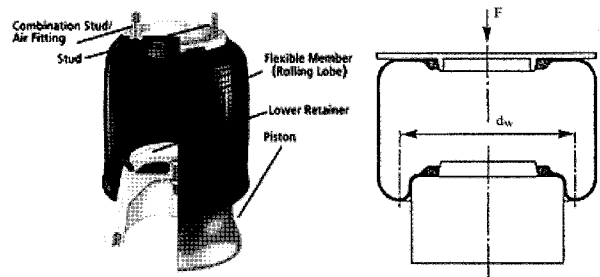


Fig. 2 Air spring (rolling robe type)

2. 공기스프링

2.1 모델식

Fig. 3은 피스톤, 실린더, 가스챔버로 묘사된 공기스프링 모델이다. 공기스프링의 하중지지능력(load carrying capacity), 즉 스프링력은 스프링내부압력과 유효면적의 곱이다. 따라서,

$$F = P_i A_w \tag{1}$$

스프링상수(spring stiffness) k 는 변위에 대한 스프링력의 변화율에 의해 계산된다.

$$k = \frac{dF}{dx} = \frac{dP_i}{dx} A_w + P_i \frac{dA_w}{dx} \tag{2}$$

이제 상태방정식 $PV^m = const$ 로부터

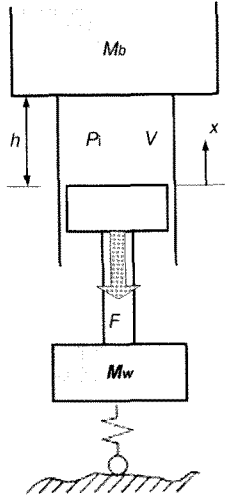


Fig. 3 Air spring model

$\frac{dP_i}{dx} = \frac{dP}{dx} = nP \frac{A_w}{V}$ 이므로 아래 식(3)을 얻는다.

$$k = n(P_{at} + P_i) \frac{A_w^2}{V} + P_i \frac{dA_w}{dx} \quad (3)$$

실린더 내부의 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{(P_i + P_{at})}{V} (Q + A \frac{dx}{dt}) \quad (4)$$

그리고 공기스프링의 동역학 식은 다음 식 (5)로 표시된다.

$$M_b \frac{d^2x}{dt^2} + d \frac{dx}{dt} + P_i A_w = W \quad (5)$$

2.2 유효단면적 측정

본 연구의 주요한 매개변수인 공기스프링의 유효면적은 실험을 통해 계측하였다. 대상은 현대자동차 에쿠스 차량의 2-코너(2-C) 후륜에 장착되는 Contintenta-Teves사 제품으로서, Fig. 4는 실험장치의 개략도를 보여준다. Fig. 5에서 보듯이 공기스프링의 상하 양 끝단을 만능시험기(UTM810)에 고정된 후 공기압축기를 이용하여 공기스프링 내부에 충압하였고, 공기 공급라인에 압력센서를 설치함으로써 공기스프링의 반력, 변위, 압력을 동시 계측하였다.

본 연구는 주기가 30초 이상인 차고높이제어 성능해석을 목표로 한다. 이에 Fig. 5에서 보듯이 기준높이 250mm로부터 ±60mm의 스트로크를 0.2Hz의 sine파형으로 천천히 가진하며 인장과 압축을 반복하였다.

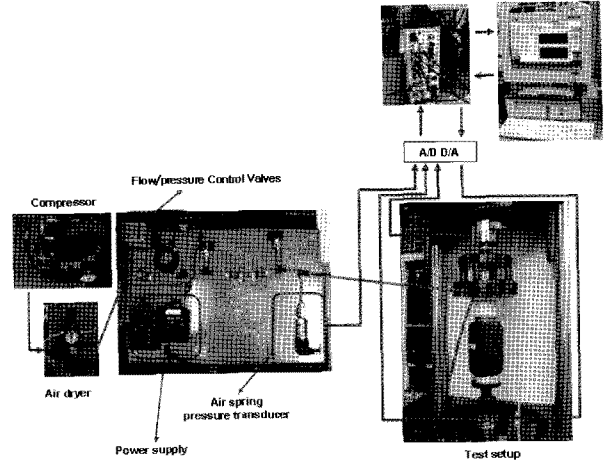


Fig. 4 Layout of test equipments

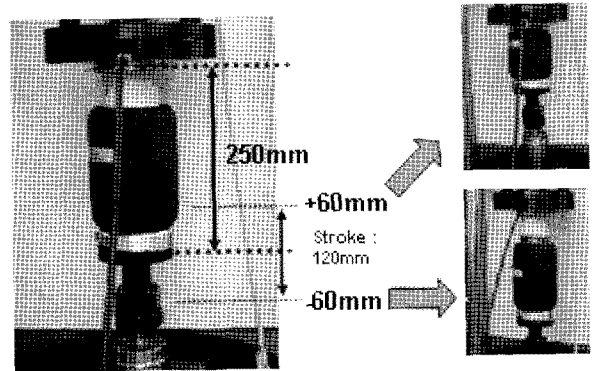


Fig. 5 Test of air spring

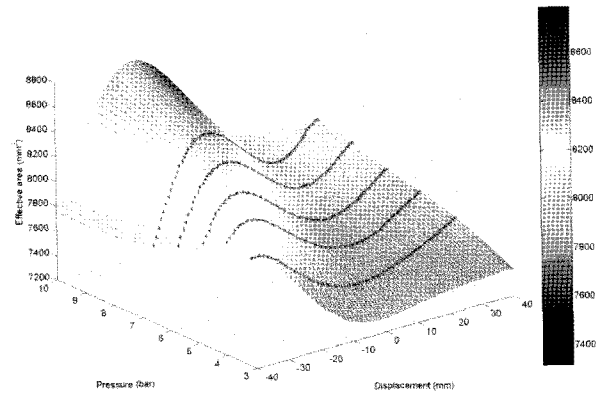


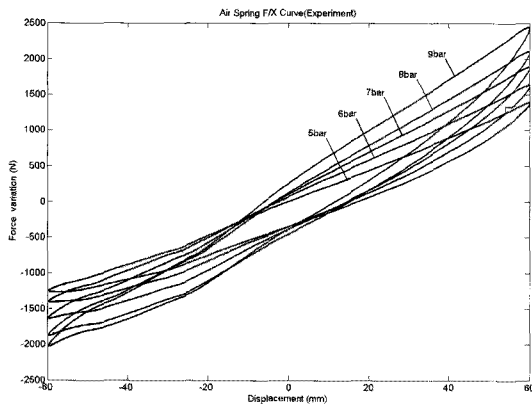
Fig. 6 Estimated effective area of air spring

유효면적은 스프링반력을 내부압력으로 나누어 계산하였다. Fig. 6은 초기설정압력 5, 6, 7, 8, 9bar에서 각각 구한 유효면적을 보간법에 의해 3차원 그래프로 나타낸 것이다. 유효면적 데이터는 Matlab의 해석 모델에 입력되어 시뮬레이션에 사용되었다.

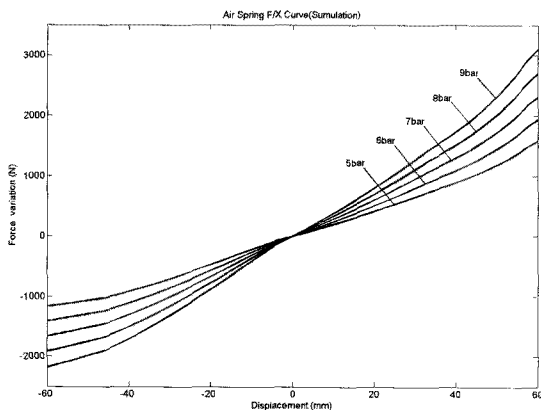
2.3 실험과 시뮬레이션 비교

Fig. 7은 스프링반력에 대한 실험과 시뮬레이션 결

과의 비교이다. 시뮬레이션은 식 (4)와 식 (5)에 의거 관성력과 댐핑력은 무시하고, 등온과정($n=1$)의 가정으로 진행하였다. 그림에서 보듯이, 초기충진압력이 클수록 스프링상수가 증가하는 결과를 실험과 시뮬레이션 모두 유사하게 보여준다. 그러나 실험에서 나타난 히스테리시스(hysteresis)를 시뮬레이션에서는 해석할 수 없었다. 히스테리시스의 원인은 공기스프링의 왕복작동 중의 열발산(heat dissipation)과 고무재료댐핑(material damping)으로 판단된다^{8,9}. 특히 압축행정에서 인장행정으로 전환 시의 열발산이 실험과 시뮬레이션 간 오차의 주요원인으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는, 사이클 주기가 긴 차고높이제어가 대상이므로 히스테리시스 오차에도 불구하고 앞 절에서 제시한 공기스프링의 해석모델 식을 사용하였다.



(a) Experiment



(b) Simulation

Fig. 7 Results of experiment and simulation for reaction forces of air spring

3. 밸브 유량계수

공압밸브의 성능은 유량계수(flow coefficient)에

크게 좌우된다. 본 연구에서는 현대 에쿠스 차량의 2-C 시스템의 각종 공압제어밸브와 공기건조기(air dryer)의 유량계수를 측정하였다.

공기유동에서 유량계수는 상·하류간의 압력비 P_d/P_u 가 임계값($P_{cr}=0.528$) 이상인 아음속유동 영역에서는 압력비가 감소함에 따라 유량은 증가한다. 그러나 임계압력비 이상의 음속영역에서는 압력비가 감소하더라도 쇼크(chock flow)현상으로 인해 유량은 더 이상 증가하지 않는다. 아음속 영역에서 미국 NFPA(National Fluid Power Association)에서 적용한 유량계수 계산식은 아래와 같다¹⁰.

$$C_v = \frac{Q}{K_g} \sqrt{\frac{G \cdot T_u}{\Delta P \cdot (P_u + P_d)}} \quad (6)$$

식 (6)에서 보듯이 유량계수를 구하기 위해서는 밸브 입·출력부의 압력과 유량, 온도에 대한 데이터가 주어져야한다. 등온조건의 가정 하에 실험장치의 배치도는 Fig. 8과 같으며, 주요 기기의 제원은 Table 1에 수록하였다.

실험은 공기압축기와 압력조절기(regulator)를 이용하여 시스템에 일정한 압력(5,6,7,8bar)의 압축공기를 공급하며, 2-C 모듈 전후로 압력센서를 설치하여 차압을 측정하였다. 동시에 스톱 밸브를 이용하여 5lpm에서 45lpm까지 유량을 조절하며 출구의 유량센서를 이용하여 유량을 측정하였다. 2-C 모듈의 각종 밸브의 솔레노이드는 전력공급기(power supply)로 ON/OFF 제어하였다.

Fig. 9는 실험결과의 한 예로서, 2-C모듈의 공급밸브와 배기밸브 중 각각 하나씩 유량계수의 산출결과이다. Fig. 8에서 보듯이 유량계수는 공급압력이 낮을수록, 혹은 유량이 증가할수록 증가한다. 이와 같은 실험 결과는 식 (6)의 유량계수 이론식과 부합한다.

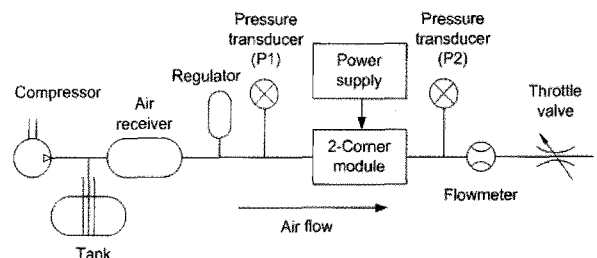
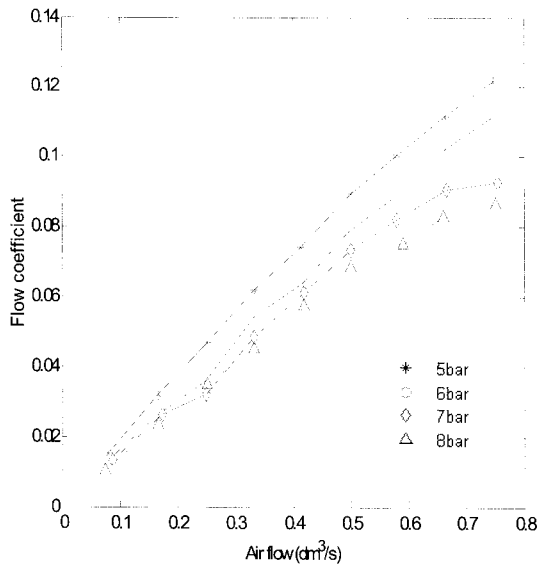


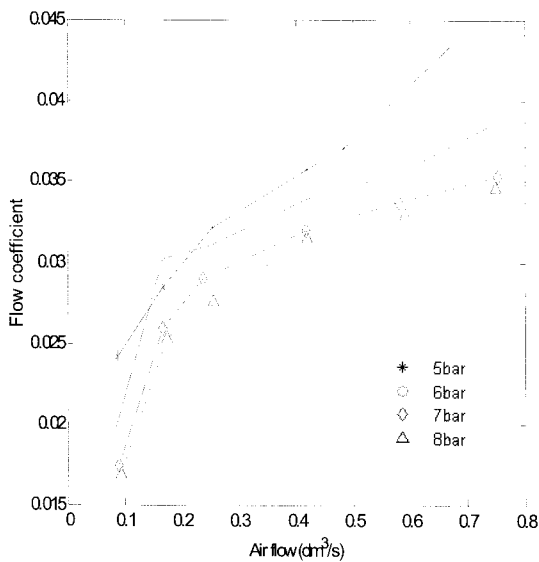
Fig. 8 Layout of test equipments to measure flow coefficient

Table 1 Specification of major components

Component	Model	Specification
Air compressor	KOHANDS	Rev speed: 1130rpm Max pressure: 10bar Volume: 40 liter
Pressure transducer	Green-sensor P-150	Pressure range: 0 ~ 10bar Accuracy: 0.5% Built-in amplifier output range: 4 ~ 20 V
Flow sensor	AALBORG GFC47	Maximum: 500Psi Flow range: 0 ~ 50lpm



(a) For supply valve



(a) For exhaust valve

Fig. 9 Example of flow coefficient measurement

4. 공압시스템

4.1 개요

공기현가시스템의 해석 모델로서 1-C 시스템을 대상으로 하였다. 1-C 시스템은 공압시스템 모델의 실험검증을 위해 2-C의 공압부품들을 사용하여 간단하게 구성하였다. Fig. 10은 실험장치의 구성도이다.

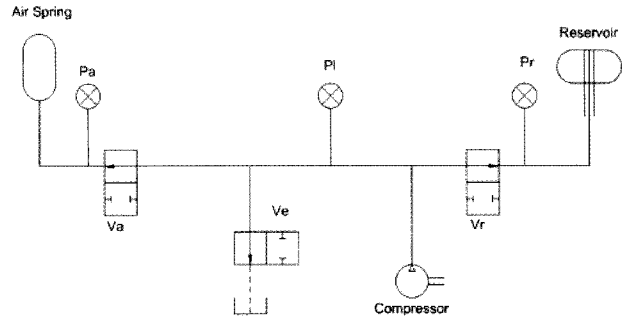


Fig. 10 1-C system layout

4.2 실험절차

실험은 세 과정으로 나누어진다. 실험 1은 하중 445kg이 가해진 공기스프링의 높이를 초기 260mm로부터 210mm로 낮춘 후, 85kg의 하중을 추가하는 실험이다. 실험 2와 실험 3은 각각 압축공기탱크(reservoir), 또는 공기압축기의 압축공기를 공기스프링에 공급하여 낮아진 공기스프링의 높이를 원위치로 복귀시키는 실험이다.

4.2.1 실험 1

- ① 공기스프링 상단에 445kg의 하중을 가한다. 이 때 스프링 내부압력은 6.05 bar이고 초기 높이는 260mm이다.
- ② 공급밸브(V_a)와 배기밸브(V_e)을 동시에 열어 공기스프링 높이를 210mm 될 때까지 배기한다.
- ③ 공기스프링 높이가 210mm가 되면 배기를 중지하고 압력을 측정한다.
- ④ 공기스프링의 높이가 210mm인 상태에서 하중을 85kg 더 추가한다.
- ⑤ 공기스프링 높이와 내부 압력을 측정한다.

4.2.2 실험 2

- ① 실험 2의 초기상태는 실험 1의 마지막 상태이다.
- ② 공기탱크의 압력상태는 항상 8bar(공기탱크 최저요구압력) 이상 유지되어야 한다.
- ③ 공기스프링 공급밸브(V_a)와 공기탱크 밸브(V_r)을 열어 공기스프링 높이가 260mm 될 때까지

압축공기를 공급한다.

④ 공기스프링의 높이가 260mm이면 실험을 중지한다.

4.2.3 실험 3

① 실험 3의 초기상태는 실험 1의 마지막 상태이다.

② 공기스프링 공급밸브(V_a)와 공기탱크 밸브(V_r)을 열어둔 상태에서 공기압축기를 이용하여 압축공기를 공급한다.

③ 에어 스프링의 높이가 260mm가 되면 공급밸브(V_a)을 차단한다.

④ 공기탱크의 압력이 8.5bar가 되면 공기압축기의 작동을 중지한다.

4.3 시스템해석 모델

Fig. 10의 1-C 공기현가시스템의 해석 모델은 Simulink와 상용 유공압해석프로그램을 통합하여 구성할 수 있다¹¹⁾. 본 연구에서는 2.1절의 공기스프링 동역학식을 Simulink로 모델링하고, 나머지 공압회로를 HyPneu 또는 AmeSim으로 모델링 하여 통합 시뮬레이션(co-simulation)하였다. 특히 각 실험과정에서의 공기압축기의 작동여부와 제어밸브의 개폐상태 공기스프링의 부하하중, 유량계수 값은 Matlab의 Stateflow를 이용하여 시퀀스 시간과 조건에 따라 제어하였다. Fig. 11은 Simulink와 HyPneu에 의한 통합시뮬레이션 모델을 보여준다.

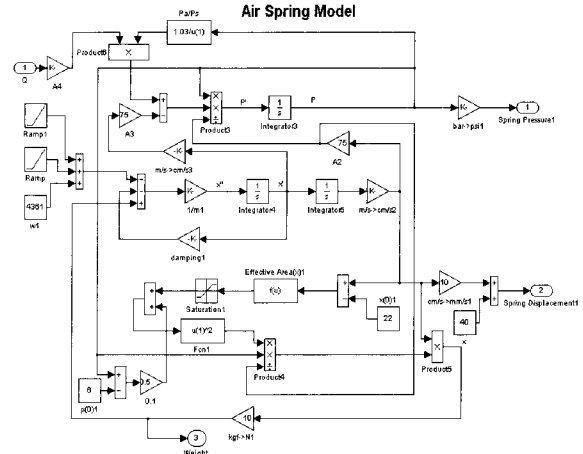
Fig. 11(c)에서 보듯이 Simulink에 의한 공기스프링, HyPneu에 의한 공압시스템 시퀀스제어를 위한 Stateflow chart가 각각 하나의 서브블록(sub-block)으로서 서로 연결되어, Simulink 환경에서 통합시뮬레이션된다. Simulink의 공기스프링 모델은 HyPneu로부터 유량을 입력받아 스프링내부압력을 수치계산한 후 HyPneu로 출력하며, HyPneu는 Simulink로부터 입력받은, 공압회로와 공기스프링의 연결 노드(node)점에서의 압력 값을 바탕으로 다음번(next time step) 유량을 계산하여 Simulink에 제공한다.

4.4 실험 및 시뮬레이션 결과

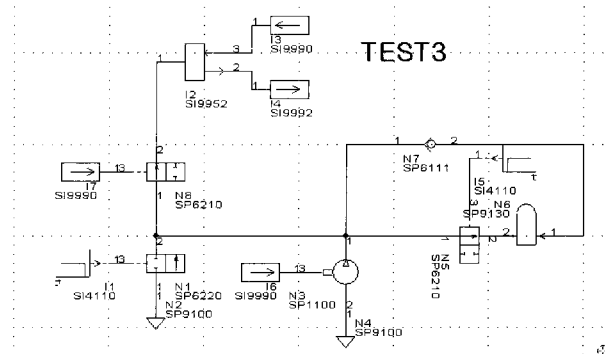
Fig. 12-14는 2.2절의 3 가지 실험과 시뮬레이션 결과를 보여준다. 실험과 시뮬레이션 결과는 모두 유사하여 본 연구에서 제시한 해석모델이 공기현가시스템의 선행개발연구에 유용하게 사용될 수 있음을 보여준다.

Fig. 12에서 보듯이 실험 1의 배기와 동시에 공기스프링 높이가 445kg의 하중에 의해 원위치인

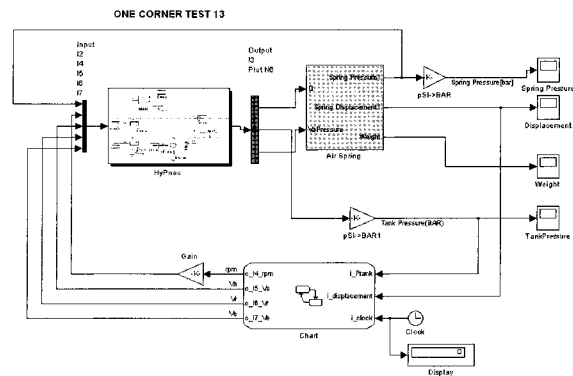
260mm로부터 50mm하강 하는데 약 3.7초가 소요되었다. 이후 시뮬레이션 시간 17초에 85kg의 하중이 증가함으로써 스프링 높이는 186mm로 낮아졌고, 스프링내부압력은 7.1bar로 상승하였는데, 실험과 시뮬레이션 결과가 유사하였다.



(a) Air spring model by Simulink



(b) Pneumatic system model by HyPneu



(c) Co-simulation model

Fig. 11 Co-simulation model of 1-C air suspension system by Simulink and HyPneu

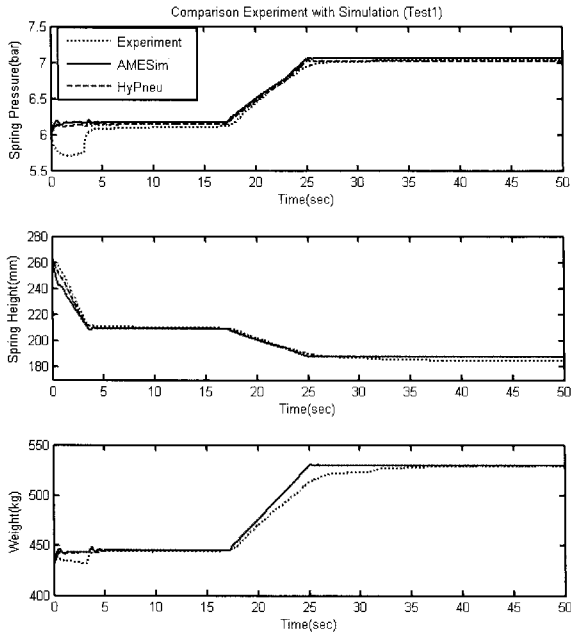


Fig. 12 Results of test 1

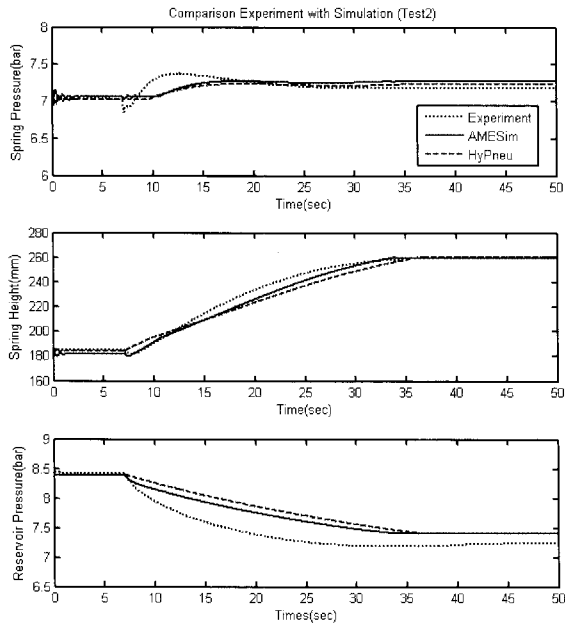


Fig. 13 Results of test 2

Fig. 13은 실험 1 이후, 공기탱크의 압축공기를 사용하여 공기스프링을 원위치로 상승시키는 실험 2의 결과이다. Fig. 13에서 보듯이, 공기스프링 상승시간은 압축공기가 공급되기 시작한 7초에서부터 35초까지 약 28초가 소요되었음을 시뮬레이션은 실험과 유사하게 보여준다. 시뮬레이션에서 공기탱크의 압력은 처음 충전압 8.4bar로부터 7.4bar까지 떨어지는 반면 실제 실험에서는 7.2bar까지 하강하는 결과를 얻었다. 이는 본 연구에서 배제된 공기스프링과 공압부품들 간의 관로 마찰손실과 열 손실에 의한 것으로 판단된다.

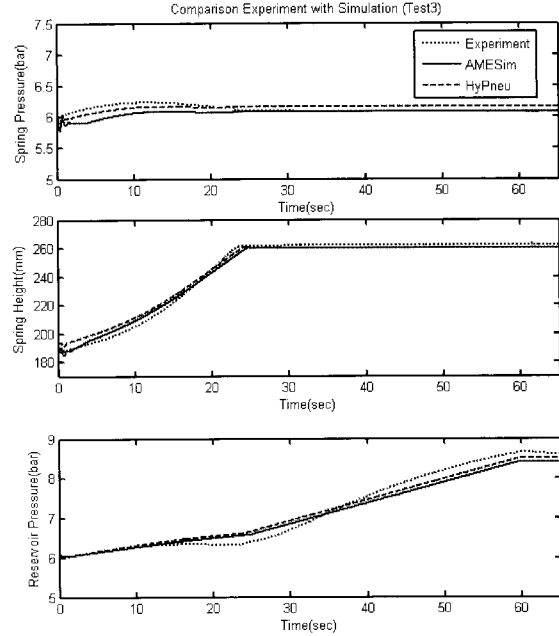


Fig. 14 Results of test 3

Fig. 14는 실험 1 이후, 공기압축기를 사용하여 공기스프링을 원위치로 상승시키는 동시에 공기탱크를 8.5bar 충전하는 실험 3의 결과이다. Fig. 14에서 보듯이, 실험과 시뮬레이션 모두 공기스프링의 높이가 260mm로 원위치하는 데 약 23초가 소요된다. 공기탱크의 압력은 약 59초만에 충전되었다.

5. 대체회로의 설계 및 해석

본 연구에서는 앞에서 소개한 공기현가시스템의 해석모델의 응용사례로서 벨기에 WABCO사의 기존 회로(Fig. 15)의 특허회피를 위한 대체회로를 제시하고 시뮬레이션을 통해 두 회로의 성능을 비교한다.

Fig. 15의 WABCO회로에서 압축공기의 전달경로는 공기압축기-건조기-체크밸브“A”-공기스프링이며, 배기경로는 공기스프링-방향제어밸브“B”-체크밸브“B”-공기건조기-방향제어밸브“A”이다. WABCO 회로의 특징은, 압축공기의 공급과 배기의 경로를 바꾸어 드라이어를 재생하는 것과 파일럿압력 작동 솔레노이드 방향제어밸브“A” 이용하여 건조기를 재생하는 동안의 파일럿압력 유지를 통해 시스템의 안전성을 확보하는 것이다.

이와 같은 WABCO회로의 대체회로로서 Fig. 16을 제시할 수 있다. Fig. 16에서 보듯이 대체회로의 압축공기 전달경로는 체크밸브“A”-공기건조기-체크밸브-3포트 2방향 제어밸브-공기스프링이며, 배기경로는 공기스프링-3/2방향제어밸브-체크밸브“B”-공기

건조기-파일럿 오픈 체크밸브이다. 제시한 대체회로는 WABCO 회로의 특징인 배기중의 건조기 재생과 파일럿 압력에 의한 시스템의 안정성을 제공한다. 파일럿 체크 밸브는 공급압과 배기압에 의해 제어되며, 공급 시 공기압축기와 연결된 파일럿 압력에 의해 닫히고 배기 시에는 배기라인과 연결된 파일럿 압력에 의해 열리게 된다.

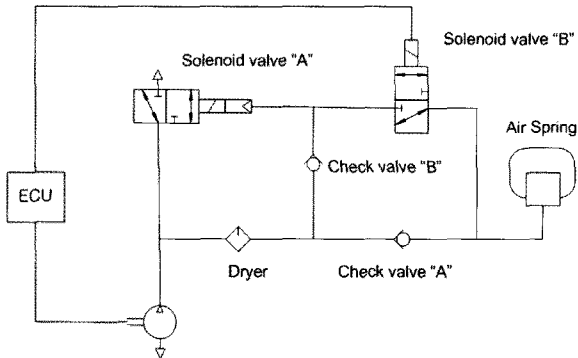


Fig. 15 Pneumatic circuit of WABCO

WABCO 회로와 대체회로의 성능을 비교하기 위해 두 회로에 대한 해석 모델을 각각 4장에서 기술한 Simulink와 HyPneu의 통합시뮬레이션 모델로 구성하였다. 시뮬레이션 시퀀스를 위해 Fig. 15와 Fig. 16의 각 솔레노이드 밸브와 압축기는 아래 Table 2와 같이 작동한다. 즉, 공기스프링을 초기높이 260mm에서 2초간 배기한 후 모든 밸브를 닫고 3초 동안 높이를 유지하였다. 그리고 5초간 50kg의 하중을 서서히 증가시켰다. 그 후 13초부터 공기압축기를 작동시켜 에어 스프링의 높이를 원위치로 상승시켰다.

Table 2 Simulation sequence

Time (sec)	WABCO Circuit			Alternative Circuit	
	Sol "A"	Sol "B"	Compressor	3/2 Sol	Compressor
0~2	on	on	off	on	off
2~5	off	off	off	off	off
5~10	Load increasing			Load increasing	
10~13	off	off	off	off	off
13~30	off	off	on	off	on

시뮬레이션 결과는 Fig. 17과 같다. Fig. 17에서 보듯이 대체회로는 WABCO회로와 유사한 성능을 발휘할 수 있음을 알 수 있다. 공기스프링의 하강 및 상승속도에 대한 편차는 대체회로의 체크밸브의 유

량계수를 조정하여 맞출 수 있을 것으로 판단된다. 이 응용사례는 본 연구에서 제시한 공기현가 공압시스템 해석 모델이 실제 시스템의 차고높이 제어 성능 해석 및 설계에 활용될 수 있음을 보여준다.

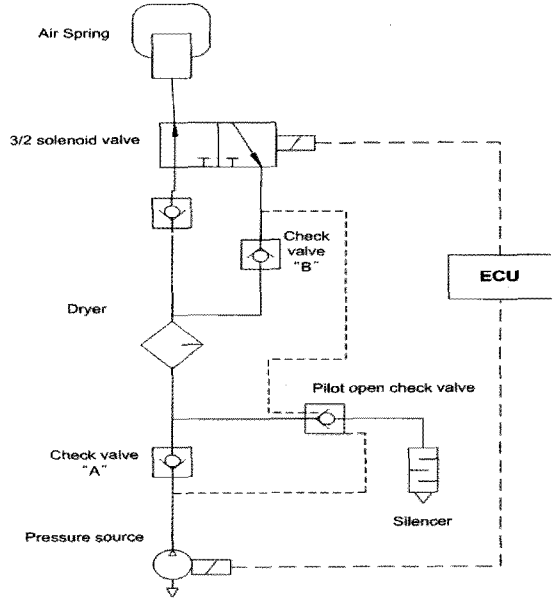


Fig. 16 Alternative circuit

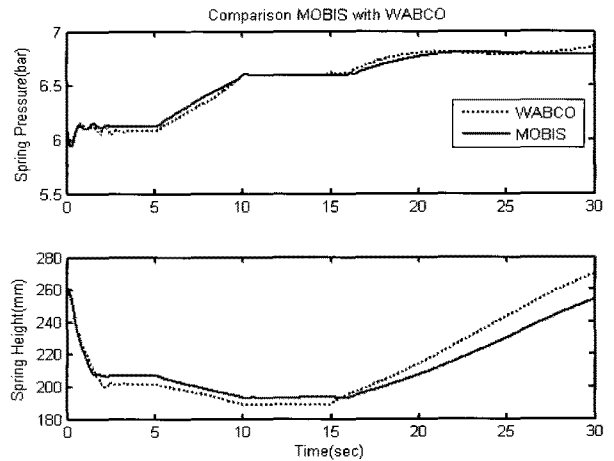


Fig. 17 Simulation results of WABCO circuit and alternative circuit

5. 결론

본 연구에서는 승용차용 공기현가시스템의 차고높이 거동특성을 해석하기 위한 Simulink와 HyPneu의 통합시뮬레이션에 의한 공압회로 해석모델을 제시하였다. 상용 공기스프링의 유효면적과 제어밸브의 유량계수는 실험을 통해 계측하였으며 시뮬레이션에 활용하였다. 현대자동차 에쿠스에 장착되는 2-C 상

용부품을 이용하여 1-C 실험장치를 구성하였으며, 실험결과는 시뮬레이션 결과와 비교하여 해석 모델의 성능을 확인하였다. 실험과 시뮬레이션 결과는 유사하여 본 연구에선 제시한 해석모델의 타당성을 보여준다. 그러나 시뮬레이션 오차를 줄이기 위해 관로 저항과 열손실을 고려한 추가 연구가 요구된다. 상용 공기현가 공압회로인 WABCO회로의 대체회로를 설계하고 시뮬레이션을 통해 성능을 확인함으로써 본 연구에서 제시한 해석모델이 공기현가시스템의 선행 개발연구에 유용하게 사용될 수 있음을 보였다.

후 기

이 연구는 지식경제부-한국 산업기술 평가원 지정 계명대학교 전자화 자동차 부품 지역혁신센터의 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

- 1) H. Wallentowitz, "Vertical/Lateral Vehicle Dynamics", Intitute fure Kraftfahrwesen, 1st Ed. IKA Verlag Aachen, 2002.
- 2) Q. Giuseppe and S. Massimo, "Air Suspension Dimensionless Analysis and Design Procedure", Vehicle System Dynamics, Vol. 35, No. 6, pp. 443~475, 2001.
- 3) R. A Williams, "Automotive Active Suspension Part 2: Practical Considerations", Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part D: J. Automobile Engineering, Vol. 211, No. 6, pp. 427~444, 1997.
- 4) 박태원, 김성수, "Rubber Tube의 고무 및 코드 지에 따른 Air Suspension 성능에 관한 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회, Vol 6, No. 4, pp. 2211~2219, 2006.
- 5) 김차식 외, "전자제어식 공기현가장치 고압 솔레노이드 밸브 블록 개발", 한국자동차공학회 추계학술대회, Vol. 6, No. 2, pp. 708~714, 2006.
- 6) 신행우 외, "대형트럭 cabin air suspension system의 유공압 모델링 및 해석", 한국자동차공학회 추계학술대회, Vol. 7, No. 2, pp. 568~573, 2007.
- 7) 성재호 외, "동역학 해석용 Air Spring Modeling 방법에 대한 고찰", 한국철도학회 춘계학술대회, Vol. 8, No. 1, pp. 370~375, 2008.
- 8) C. J. Cha, P. G. Kim and S. J. Lee, "Development of An Analytical Air Spring Model with Hysteresis Characteristics", 한국자동차공학회 추계학술대회, Vol. 6, No. 3, pp. 1964~1969, 2006.
- 9) H. Leu and J. C. Lee, "An Investigation on the Hysteresis Characteristics of an Automotive Air Spring", 4th International Conference on Mechatronics and Information Technology, Gufu, Japan, Vol. 6794, No. 6794-58, 2007.
- 10) HyPneu User's Manual, BarDyne Inc., pp. 166~167, 2003.
- 11) 이재천, Ing T. Hong, "HyPneu와 동역학 해석 프로그램의 통합 시뮬레이션에 의한 설계 유연성 증대", 유공압시스템학회지 제2권, 제1호, pp. 10~17, 2005.