

## 유공압 현가장치의 비선형 효과에 따른 차량 동적 특성 연구

안 성 주<sup>1)</sup> · 민 승 재

한양대학교 미래자동차공학과

### Analysis of Dynamic Behavior for Vehicle considering Non-linear Characteristic in Hydro-Pneumatic Suspension

Seongju Ahn<sup>1)</sup> · Seungjae Min

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

(Received / Revised / Accepted)

**Abstract** : There are various expectations for increasing of the ride comfort by drivers or passengers. The expectations make diverse methods to increase the ride comfort. A research with respect to the suspension that is more concerned with the ride comfort than the other is effective. One of suspensions including coil spring and leaf spring is hydro-pneumatic suspension. The hydro-pneumatic suspension can be to increase the ride comfort and have the advantages of the design than other suspensions that need extensive space in the vehicle. In this paper, a mathematical analysis of hydro-pneumatic suspension is needed for the analysis of dynamic characteristic of hydro-pneumatic suspension. Through the dynamic model, changing variables like initial pressure in strut and area of strut rod can make which parameters make good or bad for comfort of the vehicle. Applying this simulation, the design parameters of hydro-pneumatic suspension for the ride comfort were obtained.

**Key words** : Hydro-pneumatic suspension(유공압 현가장치), Ride comfort(승차감), Non-linear characteristic(비선형 특성), Dynamic analysis(동특성 해석), Mathematical analysis(수학적 해석)

#### Nomenclature

- $A_c$  : area of the strut piston,  $cm^2$
- $A_r$  : area of the strut rod,  $cm^2$
- $A_v$  : area of check valves and/or orifices,  $cm^2$
- $\beta$  : effective fluid bulk modulus, Mpa
- $\rho$  : fluid density,  $kg/m^3$
- $P_0$  : intial gas pressure, Mpa
- $V_{g0}$  : initial gas volume,  $cm^3$
- $C_d$  : discharge coefficient
- $r$  : polytropic exponent

#### Subscripts

- c : piton-side chamber
- r : rod-side chamber

#### 1. 서 론

자동차 산업이 점차 발전해 가면서 자동차의 주된 평가 요소인 주행성능이 향상 되어 가고 있고, 이러한 주행성능뿐만 아니라 차량의 승차감에 대해서도 많은 요구가 증가하고 있다. 운전자 혹은 동승자가 느낄 수 있는 승차감이 자동차의 큰 평가 요소 중 하나가 되어 가고 있다. 현재 현가장치에는 크게 더블 위시본 서스펜션(Double wishbone suspension), 맥퍼슨 스트럿(Mcpherson-strut suspension), 트레일링 암(Trailing arm suspension) 그리고 솔리드 액슬(Solid axle suspension) 등이 있고, 이러한 현가장치는 코일 스프링(Coil spring), 댐퍼(Damper), 하이드로 스트럿(Hydro-strut), 토션바(Torsion bar), 판스프링(Leaf spring)으로 구성되어 있다. 이러한 많은 종류의 서스펜션이 차량의 승차감을 향상시키기 위해 더욱 발전해가

\* Corresponding author, E-mail:bingju11@hanyang.ac.kr

\*초록색 글씨 부분은 그대로 두시면 됩니다.

고 있다. 이 중 가장 널리 쓰이는 코일 스프링 혹은 리프 스프링의 큰 단점인 큰 부피를 차지한다는 점을 보완하기 위해 유공압 현가장치 (Hydro-pneumatic suspension)가 쓰이고 있다. 또한 이 유공압 현가장치는 승차감도 좋아서 서스펜션으로서의 역할도 충분히 잘 수행하고 있다.

현가장치는 차량의 차체와 바닥 사이에서 발생하는 진동을 절연하여 승차감을 향상시키는 역할을 하는 장치입니다. 유공압 현가장치는 현가장치의 역할을 하기 위해서 기체와 액체를 동시에 사용한 장치입니다. 유공압의 특성을 이용하기 때문에 다른 서스펜션의 단점인 큰 부피를 차지한다는 점을 보완할 수 있는 장치입니다. 또한 유체를 사용하기 때문에 액체와 기체의 특성을 잘 알아야 유공압 현가장치에 대해 이해할 수 있습니다.

본 논문에서는 이러한 유공압 현가장치의 비선형 특성을 고려하여 수학적으로 분석하고 이를 통해 모델링을 하였다. 또한 모델링이 타당한지 검증을 실시한 후 이 모델링을 이용하여 여러 가지 설계인자에 따라 유공압 현가장치에 어떤 영향을 끼치는지 보고 설계인자 영향도 분석을 실시하였다.

## 2. HPS의 수학적 표현

유공압 현가장치에는 여러 가지 종류의 현가장치가 있습니다. 한 개의 가스 체임버와 2개의 오일 체임버를 가지고 있고, 오리피스와 체크 밸브를 통해 유체가 흐르는 Els and Grobbelaar and Sun의 유공압 현가장치와 하나의 가스 체임버와 3개의 오일 체임버로 구성되어 있는 Guo의 유공압 현가장치 그리고 트윈가스 체임버와 2개의 오일 체임버를 가지고 있는 Cao의 유공압 현가장치가 있습니다.

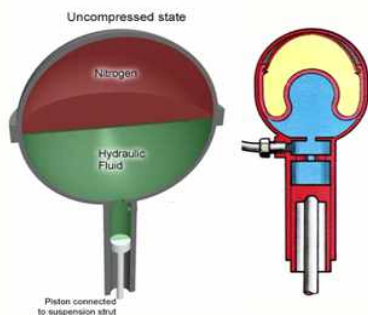


Fig. 1 Hydro-pneumatic suspension

본 논문에서는 Fig.1에 나와 있는 그림처럼 한 개의 혼합된 가스와 오일 체임버를 가지고 있는 Yang의 유공압 현가장치에 대해서 수학적 표현으로 표현했습니다. 다른 유공압 현가장치에 비해 간단한 디자인을 가지고 있습니다. 여기서는 가스와 오일이 섞일 때의 특징은 없다고 가정하고 오일 안으로 가스가 들어갈 때마다 유체의 체적 탄성률과 유체의 밀도는 감소한다.

### 2.1 유공압 현가장치 작동 원리

유공압 현가장치의 스트럿은 Fig.2처럼 2개의 체임버가 오리피스와 체크 밸브를 통해서 연결되어 있다. 피스톤 쪽의 체임버에는 가스와 오일이 같이 채워져 있고, 로드 쪽 체임버에는 오일만 채워져 있다. 스트럿 로드가 압축되는 과정에서는 오일이 피스톤 쪽 체임버에서 로드 쪽 체임버로 체크 밸브와 오리피스를 통하여 흐른다. 반대로 반동이 일어날 때에는 체크 밸브가 닫히기 때문에 오리피스를 통해서 오일이 흐른다. 이 과정이 항상 가능하도록 오일의 양은 항상 체크 밸브와 오리피스가 잠길 정도로 유지 되어야 한다. 감쇠력은 이런 오일의 흐름에 의해서 만들어진다. 초기의 가스의 압력과 부피는 원하는 가스의 부하 용량(load capacity)과 탄성 계수(spring rate)가 되도록 피스톤과 로드의 면적을 고려하여 결정 되어야 한다.

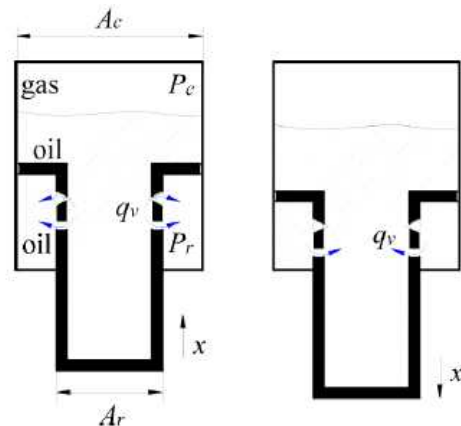


Fig. 2 Hydro-pneumatic suspension

### 2.2 유공압 현가장치의 수학적 분석

이러한 유공압 현가장치의 작동 원리를 토대로 수학적 분석을 진행하였다. 우선 스트럿 실린더와 스트럿 로드 사이에서 발생하는 마찰력을 고려하

여 유공압 현가장치의 총 힘에 대한 식을 구할 수 있다.<sup>1)-3)</sup>

$$F = P_c A_c - P_r (A_c - A_r) + f \quad (1)$$

where f : friction between strut cylinder and rod

이 때  $P_c$ 와  $P_r$ 은 피스톤 쪽 চে임버와 로드 쪽 চে임버의 유체의 압력이다. 또한  $A_c$ 와  $A_r$ 은 각각 피스톤과 로드의 유효 면적이다.

피스톤 쪽에 있는 gas와 오일의 순간적인 압력은 동일하다고 가정하고 유체의 관성은 무시한다. 또한 gas는 폴리트로픽 과정을 따르고,  $P_c$ 는 초기 gas인  $P_0$ 와 초기 부피  $V_{g0}$  그리고 순간 부피인  $V_g$ 에 의해서 얻을 수 있다.

$$V_g = v_{g0} - x \cdot A_r \quad (2)$$

$$P_c V_g^r = P_0 V_{g0}^r \quad (3)$$

where r : polytropic exponent

로드 চে임버의 압력은 오일의 압축률을 고려해서 표현할 수 있다.

$$\beta = \frac{V \Delta P}{\Delta V} \quad (4)$$

$$V_r = V_{r0} + x(A_c - A_r) \quad (5)$$

$$\therefore \frac{V_r}{\beta} \dot{P}_r = q_v - (A_c - A_r) \dot{x} \quad (6)$$

$\dot{x}$ 은 스트럿의 속도이고,  $V_r$ 은 로드 চে임버의 순간 부피이다.  $\beta$ 는 유효 체적 탄성률이고  $q_v$ 는 체크 밸브와 오리피스를 통해 흐르는 유체의 흐름이다.

$$q_v = C_d A_v \sqrt{\frac{2|P_c - P_r|}{\rho}} \cdot \text{sign}(P_c - P_r) \quad (7)$$

$C_d$ 와  $A_v$ 는 유량 계수와 체크 밸브와 오리피스 유효 면적이고  $\rho$ 는 유체의 밀도이다. 스트럿이 동작하는 동안 오일이 가스 속으로 들어가기 때문에 유체의 체적 탄성률과 밀도는 변하게 된다. 유공압 장치의 공칭인자들은 Table 1에 표시되어 있다.

| 설계인자                | 설명                                   |
|---------------------|--------------------------------------|
| $A_c$ ( $cm^2$ )    | Area of the strut piston             |
| $A_r$ ( $cm^2$ )    | Area of the strut rod                |
| $A_v$ ( $cm^2$ )    | Area of check valves and/or orifices |
| $\beta$ (Mpa)       | Effective fluid bulk modulus         |
| $\rho$ ( $kg/m^3$ ) | Fluid density                        |
| $P_0$ (Mpa)         | Initial gas pressure                 |
| $V_{g0}$ ( $cm^3$ ) | Initial gas volume                   |
| $C_d$               | Discharge coefficient                |
| $r$                 | Polytropic exponent                  |

Table 1 Nominal parameters of the HPS strut

### 2.3 실험 조건

장치의 스트럿은 초기에 0.55MPa만큼 채워져 있고, 피스톤 내의 가스 압력은 1.03MPa 로 측정되어 있다. 스트럿에 50mm 크기의 고조파 진동을 가해준다. 이 고조파 진동은 아주 적은 주파수인 0.1Hz 정도로 적용된다.

### 3. 유공압 현가장치의 동적 모델링

앞 절에서 말한 유공압 현가장치의 작동원리와 수학적 분석을 통하여 유공압 현가장치를 모델링을 하였다. 또한 이 모델이 정확한 값을 갖는지 실험 값과 유사한 경향이 나오는지 확인을 하기 위해 검증을 하면서 본 논문의 모델의 타당성을 확인하였다.

#### 3.1 Matlab을 통한 모델링

앞 절에서 실시한 수학적 분석을 바탕으로 모델링을 적용하기 위해서 Table2에 나와 있는 것처럼 설계인자들에 값을 지정해주었다. 또한 유공압 현가장치의 힘을 측정하기 위해서 실험 조건에서 지정해준 strut에 50mm 크기의 고조파 진동을 가해주기 위해  $0.025 \sin(2\pi \cdot (t-2.5))$  값을 피스톤 변위 입력에 지정해 주었다. 이렇게 피스톤에 입력변위를 준 후 수학적 모델링에 맞춰 유공압 현가장치의 힘을 볼 수 있도록 Matlab Simulink를 통해 모델링을 하였다.

| 설계인자     | 값                                 |
|----------|-----------------------------------|
| $A_c$    | 44.179                            |
| $A_r$    | 19.635                            |
| $A_v$    | 0.153 (피스톤 상승)<br>0.0707 (피스톤 하강) |
| $\beta$  | 240                               |
| $\rho$   | 830                               |
| $P_0$    | 0.86                              |
| $V_{g0}$ | 132                               |
| $C_d$    | 0.73                              |
| $r$      | 1.4                               |

Table 2 Nominal parameters value

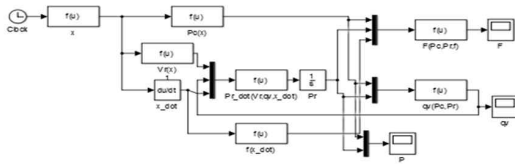


Fig. 3 Modeling of HPS using simulink

Fig.3에 나와 있는 형태처럼 모델링을 진행 하였다. 각 블록은 앞에서 말한 수학적 분석을 바탕으로 제작하였고, 실험조건을 입력변위를 주었을 때 힘이 어떻게 작용하는지 확인하였다.

### 3.2 모델 검증

Simulink를 통해 만든 모델을 검증하기 위해 기존에 나와 있는 논문의 값과 실험값을 참고로 그래프를 비교하였다.

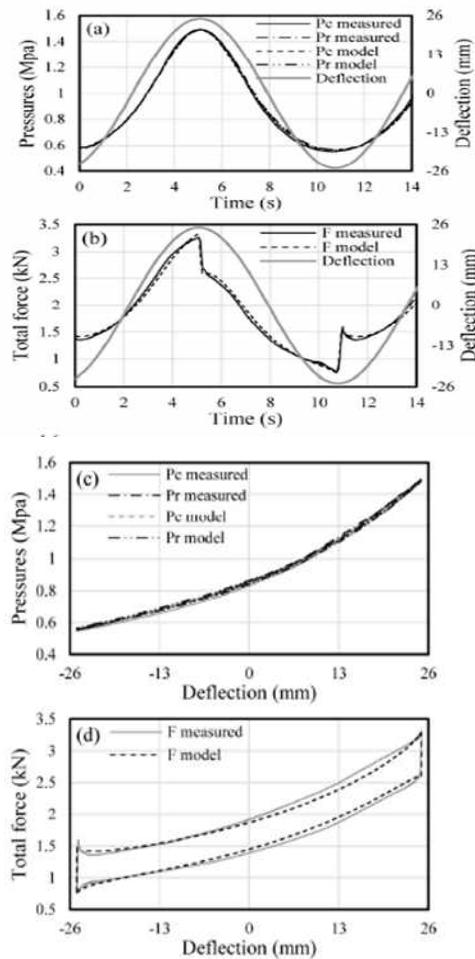


Fig. 4 (a) 2개 체임버 내 압력 변화; (b) 스트럿 힘의 변화; (c) 힘에 따른 HPS의 휨 정도; (d) 힘-휨 특성 곡선

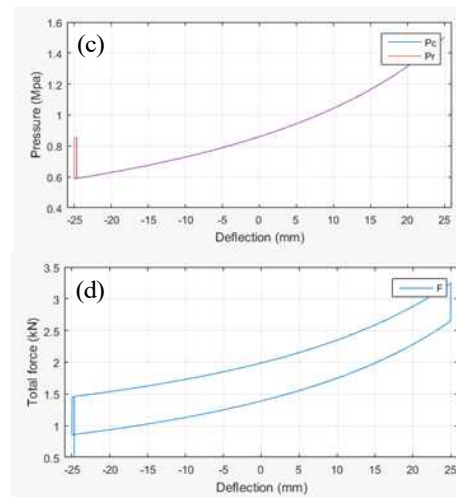
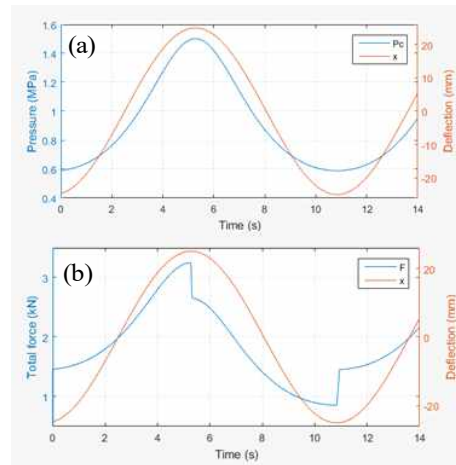


Fig. 5 (a) matlab을 통한 2개 체임버 내 압력 변화; (b) matlab을 통한 스트럿 힘의 변화; (c) matlab을 통한 힘에 따른 HPS의 휨 정도; (d) matlab을 통한 힘-휨 특성 곡선

기존 논문에 나와 있는 실험값과 이론값인 Fig.4 와 Matlab Simulink를 통해 만든 모델의 값인 Fig.5를 서로 비교해 보았다. 각각의 그래프들이 상당히 유사한 그래프 개형을 가지고 있었고, 따라서 Simulink를 통한 모델링이 유효한 값을 갖고 Simulink 모델 값을 이용하여 유공압 현가장치의 특성을 분석할 수 있는 타당성을 얻었다. 만든 모델을 검증하기 위해 기존에 나와 있는 논문의 값과 실험값을 참고로 그래프를 비교하였다.

### 4. 차량 동적 특성 해석 결과

검증된 모델을 통하여 차량의 동적 특성을 알아 보고 이를 해석하였다. Quarter-Car 모델을 사용하여 방지턱을 통과할 때 차체의 max deflection

값을 찾아보고 유공압 현가장치의 탄성 계수에 영향을 줄 수 있는 인자들을 변화시켜 유공압 현가장치의 강성 값을 분석하여 각 인자들이 유공압 현가장치 강성에 어떤 영향을 주는지 알아보았다.

#### 4.1 해석 조건

도로법에 의해 지정된 도로 교통의 안전 증진을 도모하고 교통사고를 예방하기 위해 설치하는 과속 방지턱을 지정하였다. Fig. 6에 나와 있는 그림처럼 3.6m 이내의 폭과 10cm 이내의 높이로 방지턱을 제작해야 한다.<sup>6)</sup> 또한 자동차의 속도가 30km/h 미만인 곳에 설치해야 하므로 차량의 속도를 30km/h로 선정하여 Quarter-car 모델이 5초에 최대 변위를 지나도록 입력 변위를 지정하였다.

$$\text{방지턱 포물선} : -\frac{1}{22.4}(x-5)^2 + 0.1$$

where  $(3.2 < x < 6.8)$

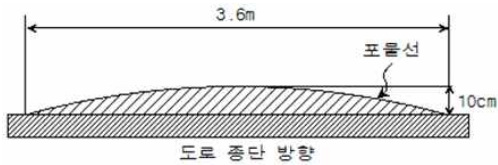


Fig. 6 도로법에 의한 과속 방지턱 규격

Quarter-car 모델을 Fig.7 과 같이 만들어서 Table 3의 상수 값들을 넣어 시뮬레이션 하였다.

$$m_s \ddot{y}_s = -k_s(y_s - y_{us}) - c_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) \quad (8)$$

$$m_{us} \ddot{y}_{us} = k_s(y_s - y_{us}) + c_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) + k_t(s - y_{us}) \quad (9)$$

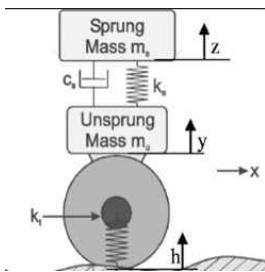


Fig. 7 Quarter-car model

| 구분       | 값          |
|----------|------------|
| $m_s$    | 400 Kg     |
| $m_{us}$ | 50 Kg      |
| $C$      | 3000 Nm/s  |
| $K_t$    | 250000 N/m |

Table 3 Nominal parameters value

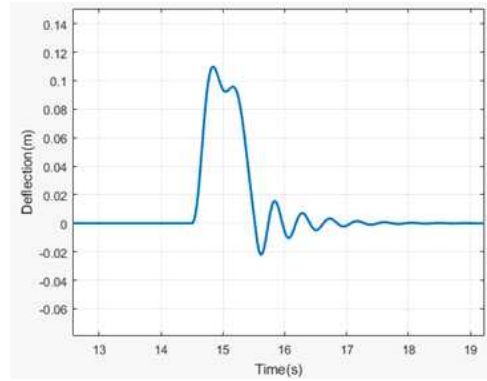


Fig. 8 방지턱 통과 시 차체의 변위

이 식에서  $k_s$  값에 앞에서 구한 유공압 현가장치의 강성 값을 넣고 해석 조건인 과속 방지턱을 넘을 때의 차체의 최대 변위를 측정해 보았다. Fig.8에서 보이는 것과 같이 차체의 변위가 위아래로 흔들리는 것을 볼 수 있다.

#### 4.2 설계 인자에 따른 영향도 분석

$$K = A_r \frac{dP_c}{dx} \quad (10)$$

유공압 현가장치의 강성 값을 통해 유공압 현가장치에서 강성 값에 영향을 줄 수 있는 인자들을 확인 한 후 이 인자들의 변화를 주었다.

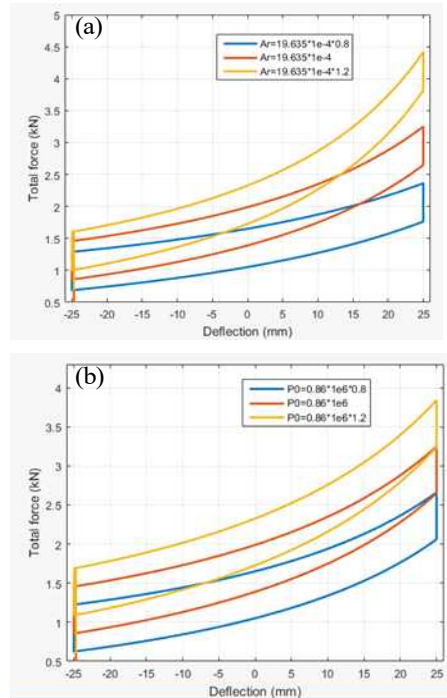


Fig. 9 (a) 로드 면적( $A_r$ ) 변화에 따른 강성; (b) 가스 초기 압력( $P_0$ ) 변화에 따른 강성;

\*초록색 글씨 부분은 그대로 두시면 됩니다.

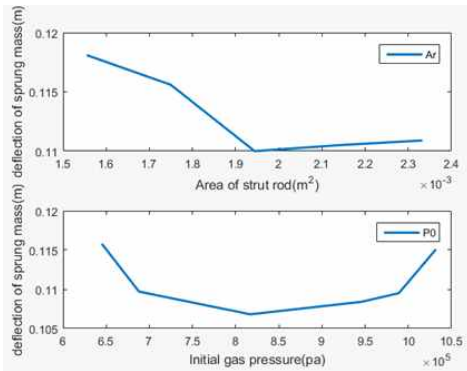


Fig. 10 설계 인자 값에 따른 최대 변위

Fig.9 그림과 같이 2가지 인자를 변화 시켰을 때 유공압 현가장치의 강성 값이 변하는 정도를 알 수 있다. 이런 강성 값의 변화를 사용하여 기존 시뮬레이션과 마찬가지로 방지턱을 넘게 하고 그때의 최대 변위 값을 측정해보았다.

Fig. 10 그림과 같이 각각의 인자를 변화 시켰을 때 차체의 최대 변위를 구할 수 있었다.

#### 4. 결론

이상과 같은 모델링과 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 비선형 특성이 반영된 유공압 현가장치 (Hydro pneumatic suspension)의 모델을 개발하였다. 이 모델은 유공압 현가장치의 비선형성을 고려하여 비선형 특성을 파악하는데 유용하게 이용될 수 있다.

2) Quarter-car model을 통하여 과속 방지턱을 통과 할 때의 차체의 동특성을 분석하고 해석하였다.

3) 유공압 현가장치의 설계 인자 값 변화에 따라서 차체의 동특성이 어떻게 변화하는지 영향도를 분석하였다. 이러한 영향도는 유공압 현가장치를 제작할 때 필요한 강성을 만들 때 유용하게 이용될 수 있다.

#### References

1) Yin et al. "Effects of Entrapped Gas within the Fluid on the Stiffness and Damping Characteristics of a Hydro-Pneumatic Suspension Strut", 2017, SAE  
2) Guo, K., Chen, Y., Zhuang, Y. and Jia.,

"Modeling and simulation of a hydro-pneumatic spring based on internal characteristics," Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2011.

3) Cao, D., Rakgeja, S., and Su, C., "Pitch plane analysis of a twin-gas-chamber strut suspension," Proc. Inst. Mech. Eng. Pt.D: J. Automobile Eng. 222(8):1313-1335, 2008.  
4) Nakayama Y. and Boucher R, "Introduction to fluid mechanics,"Butterworth-Heineman, 1998.  
5) I. Szaszi., P. Gaspar. and J. Bokor., "Nonlinear active suspension modelling using linear parameter Nakayama Y. and Boucher R, "Introduction to fluid varying approach " Computer and automation research institute, Hungarian Academy of Sciences, 2002.  
6) 국토교통부 “도로법 제 2조” - 과속방지턱