

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(11), 939-950(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.11.939

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 항공기 올레오식 2중 완충기 종류에 따른 특성 비교 연구

## Part I. 수학적 모델링

이철순\*, 정선호\*, 김경중\*, 김정호\*, 조진연\*\*

Comparative Study on the Several Types of Double-Acting  
Oleo-Pneumatic Shock Absorbers of Aircraft

## Part I. Mathematical Modeling

Cheol Soon Lee\*, Seon Ho Jeong\*, Kyung Jong Kim\*, Jeong Ho Kim\* and Jin Yeon Cho\*\*

Department of Aerospace Engineering, Inha University\* ,\*\*

## ABSTRACT

In this work, mathematical models are newly presented for three types of double-acting oleo-pneumatic shock absorbers as the first part of a comparative study on the several types of double-acting oleo-pneumatic shock absorbers. After a typical single-acting shock absorber model is presented for the sake of completeness, mathematical models of three types of double-acting shock absorbers are proposed. To derive the models, Bernoulli equation and orifice discharge coefficient are utilized along with the assumptions of incompressibility and poly-tropic process. The proposed models are expected to be used for investigation of the salient features of several types of double-acting oleo-pneumatic shock absorbers.

## 초 록

본 연구에서는 세 가지 종류의 올레오식 2중 완충기 특성 비교를 위한 첫 단계 연구로서 수학적 모델링을 새롭게 수행하였다. 논문의 완결성을 위해 먼저 전형적인 올레오식 단일 완충기에 대한 모델을 제시한 후, 세 가지 종류의 올레오식 2중 완충기에 대한 수학적 모델을 유도하였다. 수학적 모델링을 위해 베르누이 방정식과 오리피스 방출계수를 이용하였으며, 완충기 내부의 기체와 유체는 각각 폴리트로픽 과정 그리고 비압축성으로 가정하였다. 올레오식 2중 완충기 특성 연구에 제안된 모델을 적극 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

**Key Words :** Double-Acting Oleo-Pneumatic Shock Absorber(올레오식 2중 완충기), Mathematical Model(수학적 모델), Aircraft Landing Gear(항공기 착륙 장치), Orifice(오리피스), Discharge Coefficient(방출계수)

† Received : December 16, 2016      Revised : August 3, 2017      Accepted : August 8, 2017

\*\* Corresponding author, E-mail : cjy@inha.ac.kr

### 1. 서론

항공기 사고의 대부분은 이착륙 시 발생하며, 항공기 착륙 장치(aircraft landing gear)는 이러한 이착륙 시 발생하는 충격하중 등을 흡수하는 중요한 장치이다. 대부분의 항공기 착륙 장치는 완충기와 지지대 및 작동기 등으로 이루어져 있다. 이 중 완충기는 충격을 흡수하여 완화시키는 역할을 담당하기 때문에 항공기 이착륙 요구 조건에 따라 효율적으로 하중을 흡수할 수 있도록 설계해야 하며, 이를 위해서는 완충기 거동을 명확히 예측하여 반영할 수 있어야 한다.

현재 중대형 항공기에 많이 활용되고 있는 올레오식 완충기(oleo-pneumatic shock absorber)는 기체와 유체로 구성된 챔버를 이용하여 탄성력과 감쇠력을 만들어 내는 완충기로서, Fig. 1에 도시한 바와 같이 뛰어난 무게 대비 완충효율을 갖는 것으로 알려져 있다[1]. 이러한 올레오식 완충기는 한 개의 가스 챔버를 갖는 올레오식 단일 완충기(single-acting oleo-pneumatic shock absorber)와 고압과 저압 두 개의 가스 챔버를 갖는 올레오식 2중 완충기(double-acting oleo-pneumatic shock absorber)로 대별될 수 있다. 일반적으로 올레오식 2중 완충기는 올레오식 단일 완충기에 비해 Fig. 2에 도시한 바와 같이 동일한 스트로크에 대해 더 작은 하중이 발생되고, 이로 인해 항공기 지상 운용 측면에서 거친 노면을 이동할 때 동체로 전달되는 진동을 줄일 수 있는 장점이 있어 앞선 착륙 장치(nose landing gear)에 주로 사용되고 있다[1].

올레오식 단일 완충기의 정식화 연구는 Milwitzky와 Cook[2]에 의해 선구적으로 수행된 바 있으며, 이후 Daniels[3]는 팽창 시 감쇠효과를 증가시키는 스너버 오리피스(snubber orifice)를 보조로 갖는 완충기에 대한 정식화 연구를 수행한 바 있다. 단일 완충기 관련 수치적 연구로는 참고문헌 [4-7]등을 들 수 있다.

하지만 문헌조사에 의하면 기존 연구는 대부분 올레오식 단일 완충기에 집중되어 있으며, 올레오식 2중 완충기는 실제로 많이 사용되고 있음에도 불구하고, 발표된 관련 연구는 대단히 불충분한 실정이다. 올레오식 2중 완충기는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 세 가지로 대별될 수 있으며, 그 중 A형은 완충기 상단에 고압과 저압의 가스 챔버가 이웃하여 위치하는 형태이고, B형의 경우에는 저압가스 챔버와 고압가스 챔버가 각각 상단과 하단에 위치하는 형태이다. A형과 B형 2중 완충기에 대해서는 Melik-Zade[8],

Nie 등[9, 10]에 의해 연구된 바 있으나, 명확한 정식화 과정이 제시되지 않아 후속 연구에 원활히 활용하기 어려운 측면이 있다. 이외에 Terze 등[11]은 B형 2중 완충기 형상에 대해 해석을 진행한 바 있으나 정식화 과정이 언급되지 않았고, Kim 등[12]은 A형 2중 완충기를 회전익기 착륙장치에 적용하여 지상공진 연구를 수행한 바 있다. 한편 상부와 하부에 오리피스를 갖는 C형 2중 완충기의 경우에는 정선호 등[13]의 연구 이외에 찾아보기 힘든 실정이다.

이에 본 논문에서는 Fig. 3에 도시한 세 가지 종류의 2단 완충기 특성을 비교 분석하기 위해, 각각의 형상에 대하여 체계적 정식화 과정을 제시하고 이를 통해 수학적 모델을 유도하였다. 그리고 이를 기반으로 후속 연구[14]에서 각종 올레오식 2중 완충기 종류에 따른 특성을 비교 분석하도록 하였다.

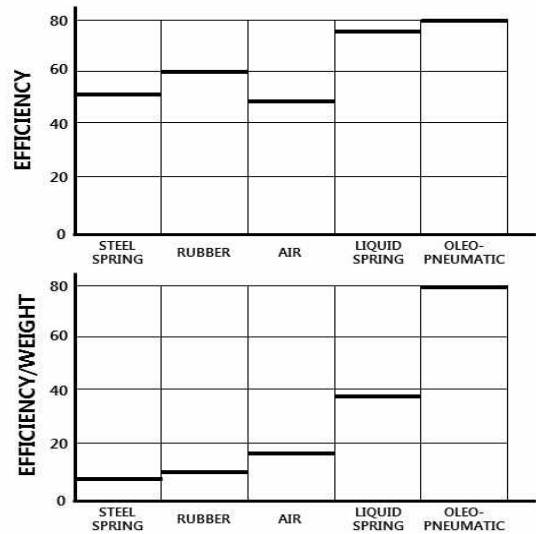


Fig. 1. Shock absorber efficiencies

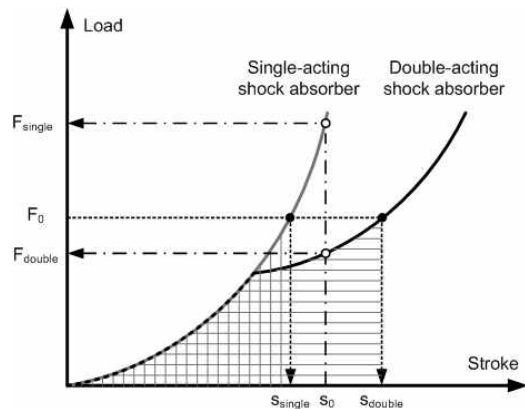


Fig. 2. Stroke vs. load curve (single-acting vs double-acting)

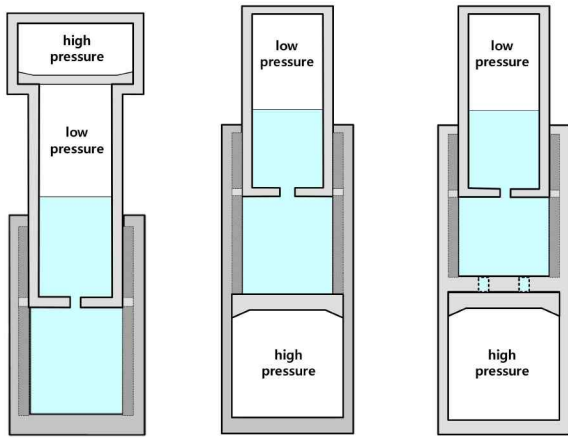


Fig. 3. Three types of double-acting absorbers

## II. 본 론

### 2.1 올레오식 완충기의 정식화

본 절에서는 Fig. 3의 세 가지 올레오식 2중 완충기에 대한 정식화를 수행하였다. 이를 위해 참고문헌 [2]와 같이 실제 기체의 압력-부피 관계를 적절히 표현할 수 있도록 폴리트로픽 관계식[15]을 적용하였으며, 유체에는 비압축성 가정 하에 연속방정식과 베르누이 방정식을 적용하였다. 또한 오리피스 점성효과를 고려하기 위해 방출계수(discharge coefficient)를 적용하였으며 [2, 16], 벽면과 내부 격막의 마찰은 무시하였다.

세 가지 2중 완충기는 고압가스 챔버가 작동하기 이전에는 모두 단일 완충기처럼 작동하지만, 고압가스 챔버가 작동하면 거동이 달라지게 된다. 그러므로 올레오식 2중 완충기 거동은 고압가스 챔버가 작동하기 이전에는 단일 완충기로, 고압가스 챔버가 작동한 이후부터는 각 고압챔버의 특성을 고려하여 해석해야 한다.

이를 위해 우선 올레오식 단일 완충기에 대해 약술하였다. Fig. 4에는 올레오식 단일 완충기의 제원 및 필요 변수를 나타내었고, 압축 시 내부 유체의 거동을 도시하였다.  $A_{a1}$ 과  $A_h$ 는 가스 챔버와 유체 챔버의 단면적을 의미하고  $P_{a1}$ 과  $P_h$ 는 가스 챔버와 유체 챔버의 압력을 의미한다. 상하부 실린더의 길이는  $L_1$ 과  $L_h$ 로 나타내었고, 변위는  $u_1$ 과  $u_2$ 로 나타내었다. 그리고 상하부 실린더의 상대적 스트로크는  $s$ 로 표기하였으며, 가스 챔버와 유체 챔버의 기체부피와 유체부피를 기술하기 위해  $x_1$ 과  $x_h$ 를 도입하였다.

우선 챔버 기체에 폴리트로픽 관계식[15]를 적용하여 압력-부피 관계식 (1)을 얻을 수 있다.

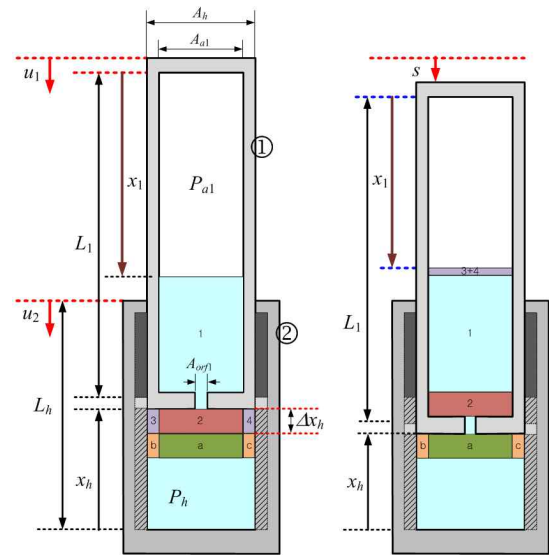


Fig. 4. Single-acting shock absorber

$$P_{a1} = P_{a1}(0) \left( \frac{V(0)}{V} \right)^n = P_{a1}(0) \left( \frac{x_1(0)A_{a1}}{x_1A_{a1}} \right)^n \quad (1)$$

여기서  $P_{a1}$ 은 가스 챔버의 압력,  $P_{a1}(0)$ 은 가스 챔버의 초기 압력,  $V$ 는 가스 챔버의 부피,  $V(0)$ 는 가스 챔버의 초기부피를 의미하고,  $n$ 은 폴리트로픽 지수로서 실험 자료를 보간하여 구할 수 있다[2,15]. 그리고 완충기 길이의 기하학적 관계를 이용하면 다음을 얻을 수 있다.

$$s + L_1 + x_h = const \quad (2)$$

한편 내부 유체가 비압축성이므로 그 부피가 항상 일정하다는 사실을 적용하면 (3)식을 얻을 수 있으며, (2)식 (3)식을 미분하여 조합하면 (4)식을 얻을 수 있다.

$$(L_1 - x_1)A_{a1} + x_hA_h = const \quad (3)$$

$$\dot{x}_1A_{a1} + \dot{s}A_h = 0 \quad (4)$$

그리고 오리피스를 통과하는 유체의 압력과 유속의 관계를 얻기 위해 베르누이 방정식을 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1} : compression(\dot{s} \geq 0)] \\ P_h + \frac{1}{2}\rho v_{up}^2 = P_{a1} + \frac{1}{2}\rho v_{orf1}^2 \\ [P_{a1} > P_h : extension(\dot{s} < 0)] \\ P_h + \frac{1}{2}\rho \hat{v}_{orf1}^2 = P_{a1} + \frac{1}{2}\rho v_{down}^2 \end{cases} \quad (5)$$

이때 압력 차에 따라 올레오 완충기의 오리피스를 통해 유체가 올라가거나 내려갈 수 있다. 이를 구분하여 나타내기 위해 유체가 상승하거

나 하강할 때 오리피스에서 방출되는 유속을 각각  $v_{orfl}$ 과  $\hat{v}_{orfl}$ 로 따로 표기하였다. 그리고 압축 시 오리피스를 통해 위로 유입되는 유속을  $v_{up}$ 으로, 팽창 시 오리피스를 통해 아래로 유입되는 유속을  $v_{down}$ 으로 표기하였다.

한편 압축과 팽창 시 오리피스를 통해 출입하는 유체에 대해 연속방정식을 적용하면 (6)식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] & v_{orfl}A_{orfl} = v_{up}A_h \\ [P_{a1} > P_h] & \hat{v}_{orfl}\hat{A}_{orfl} = v_{down}A_{a1} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 유체가 올라가거나 내려갈 때 변화하는 오리피스 면적을 고려하기 위해 오리피스 면적을 각각  $A_{orfl}$ 과  $\hat{A}_{orfl}$ 로 나타내었다. 한편 그림으로부터 알 수 있듯이 압축 시 오리피스를 통해 위 방향으로 시간당 유출되는 유체량은 압축 시  $(-\dot{x}_hA_h)$ 이므로 다음 식이 만족된다. (팽창 시 아래 방향으로 시간당  $\dot{x}_hA_h$ 만큼 유출)

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] & -\dot{x}_hA_h = v_{orfl}A_{orfl} = v_{up}A_h \\ [P_{a1} > P_h] & \dot{x}_hA_h = \hat{v}_{orfl}\hat{A}_{orfl} = v_{down}A_{a1} \end{cases} \quad (7)$$

한편 (2)식을 미분하면  $\dot{s} = (-\dot{x}_h)$ 이므로  $v_{up} = \dot{s}$ 이고  $v_{down} = -\dot{s}A_h/A_{a1}$ 임을 알 수 있다.

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] & v_{up} = \dot{s} \\ [P_{a1} > P_h] & v_{down} = (-\dot{s}A_h)/A_{a1} \end{cases} \quad (8)$$

오리피스 점성효과를 반영하기 위해 베르누이 방정식 (5)에 오리피스 방출계수  $C_d$ 를 적용 [2,16]한 후 (6-8)식을 활용하면 다음 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1} : \text{compression } (\dot{s} \geq 0)] \\ P_h - P_{a1} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} [v_{orfl}^2 - v_{up}^2] \\ = \frac{1}{2} \frac{\rho \dot{s}^2}{C_d^2} \left[ \left( \frac{A_h}{A_{orfl}} \right)^2 - 1 \right] \\ [P_{a1} > P_h : \text{extension } (\dot{s} < 0)] \\ P_{a1} - P_h = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} [\hat{v}_{orfl}^2 - v_{down}^2] \\ = \frac{1}{2} \frac{\rho (-\dot{s})^2}{C_d^2} \left[ \left( \frac{A_{a1}}{\hat{A}_{orfl}} \right)^2 - 1 \right] \left( \frac{A_h}{A_{a1}} \right)^2 \end{cases} \quad (9)$$

이상의 식을 정리하여 나타내면 Table 1과 같다. 위에서 알 수 있듯이 올레오식 단일 완충기 거동을 알기 위해서는 주어진 스트로크 변화율

Table 1. Mathematical model for single-acting shock absorber

<p>Find <math>(x_1, P_{a1}, P_h)</math> with the given <math>\dot{s}</math></p> <p>[A] <math>\dot{x}_1 A_{a1} + \dot{s} A_h = 0</math></p> <p>[B] <math>P_{a1} = P_{a1}(0) \left( \frac{x_1(0) A_{a1}}{x_1 A_{a1}} \right)^n</math></p> <p>[C] <math>\begin{cases} [\dot{s} \geq 0 : \text{compression}] &amp; P_h - P_{a1} = C \dot{s}^2 \\ [\dot{s} &lt; 0 : \text{extension}] &amp; P_{a1} - P_h = \hat{E} e^2 (-\dot{s})^2 \end{cases}</math></p> <p>where <math>\left( \begin{array}{l} C = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left( \frac{A_h}{A_{orfl}} \right)^2 - 1 \right] \\ \hat{E} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left( \frac{A_{a1}}{\hat{A}_{orfl}} \right)^2 - 1 \right] \\ e = \frac{A_h}{A_{a1}} \end{array} \right)</math></p>
---

$\dot{s}$ 에 대하여 방정식 세 개로 미지수 세 개  $(x_1, P_{a1}, P_h)$ 를 결정하면 된다. 이러한 내부 변수를 구하기 위한 수치적 기법에 대해서는 본 연구의 후속 연구인 [14]에 제시하였다.

2.1.1 A형 올레오식 2중 완충기

Figure 5에는 A형 2중 완충기가 압축될 때 유발되는 내부 유체의 움직임 순차적으로 도시하고, 이와 함께 정식화에 필요한 제원과 변수를 나타내었다. 앞서의 단일 완충기 경우와 유사하게  $A$ 와  $P$ 는 각각 단면적과 압력을 나타내며,  $L$ 은 실린더의 길이를,  $c_1$ 과  $c_2$ 는 실린더의 특정 길이를 나타내며,  $x$ 는 내부 챔버들의 높이를 의미하고  $s$ 는 완충기 스트로크를 의미한다. 그리고 하첨자  $a1$ 은 저압가스 챔버,  $a2$ 는 고압가스 챔버,  $h$ 는 유체 챔버를 나타낸다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 고압가스 챔버와 저압가스 챔버를 구분 짓는 격막③이 움직이기 전까지는 단일 완충기와 거동이 동일하기 때문에, 본 절에서는 저압가스 챔버의 압력이 점차 증가하여 고압가스 챔버의 압력과 동일하게 된 후 격막③이 움직이는 경우에 대해 정식화를 수행하도록 한다. 이때 벽면과 격막의 마찰은 무시하였다. 단일 완충기와 마찬가지로 저압과 고압가스 챔버의 압력-부피 관계는 폴리트로픽 과정에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{cases} [\text{저압챔버}] & P_{a1} = P_{a1}(0) \left( \frac{V_{a1}(0)}{V_{a1}(x_1, x_2)} \right)^n \\ [\text{고압챔버}] & P_{a2} = P_{a2}(0) \left( \frac{V_{a2}(0)}{V_{a2}(x_2)} \right)^n \end{cases} \quad (10)$$

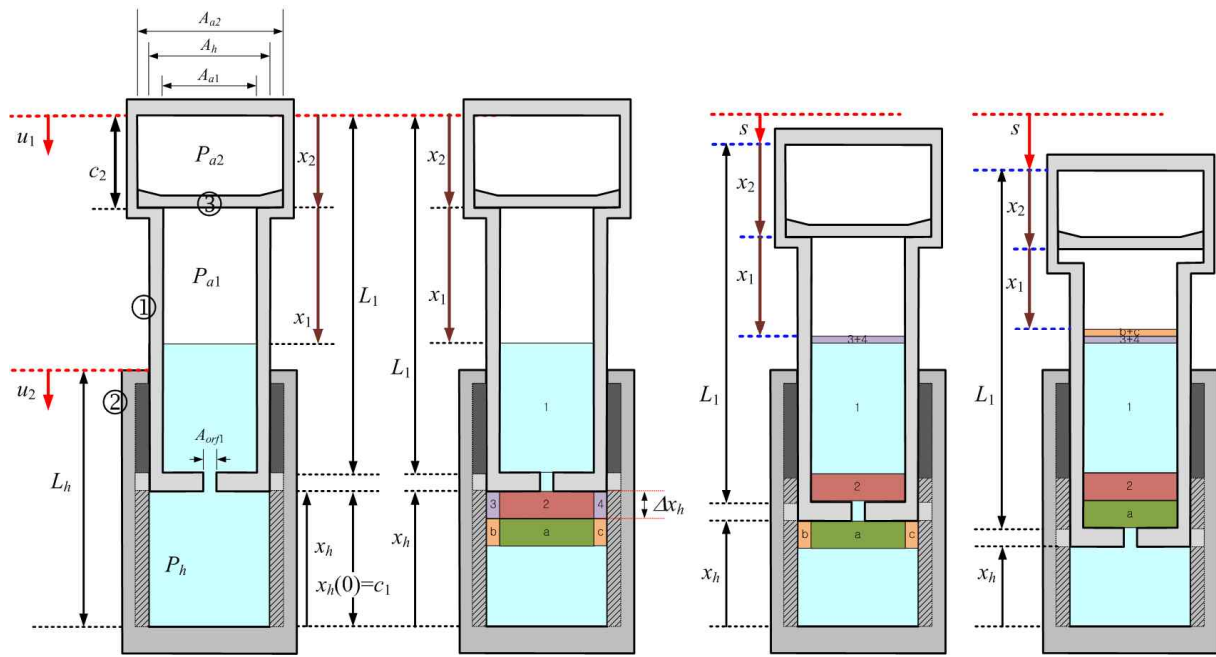


Fig. 5. Sequential behavior of A-type double-acting oleo-pneumatic shock absorber

여기서 저압가스 챔버의 기체 부피  $V_{a1}$ 은  $x_2$ 가  $c_2$ 와 같을 경우에는  $x_1$ 으로만 기술될 수 있고  $x_2$ 가  $c_2$ 보다 작을 경우에는  $x_1$ 과  $x_2$ 에 의해 기술될 수 있다. 고압가스 챔버 기체부피  $V_{a2}$ 는  $x_2$ 에 의해 기술될 수 있다. 한편 완충기의 기하학적 관계식도 (2)식과 동일하게 기술될 수 있다.

또한 내부 유체가 비압축성이므로 그 부피가 항상 일정하다는 사실을 적용하면 (11)식을 얻을 수 있다. 이때 (11)식은 유체가 단면적이  $A_{a2}$ 인 고압 챔버 영역으로 유입되지 않았을 때와 유입되었을 때를 고려하여 나타낸 것이다.

$$\begin{cases} [x_1 + x_2 \geq c_2] \\ A_h x_h + A_{a1}(L_1 - (x_1 + x_2)) = const \\ [x_1 + x_2 < c_2] \\ A_h x_h + A_{a1}(L_1 - c_2) + A_{a2}(c_2 - (x_1 + x_2)) = const \end{cases} \quad (11)$$

한편 (11)식을 미분하여 얻는 식에 완충기의 기하학적 관계식 (2)를 미분하여 얻게 되는 결과 ( $\dot{s} = -\dot{x}_h$ )를 대입하면 (12)식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} [x_1 + x_2 \geq c_2] \quad A_{a1}\dot{x}_1 + A_{a1}\dot{x}_2 + A_h\dot{s} = 0 \\ [x_1 + x_2 < c_2] \quad A_{a2}\dot{x}_1 + A_{a2}\dot{x}_2 + A_h\dot{s} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

그리고 단일 완충기와 마찬가지로 오리피스스를 통해 상하로 출입하는 유체에 대해 베르누이 방

정식을 적용하면  $P_h$ 가  $P_{a1}$ 보다 크거나 같을 때 혹은 작을 때에 따라 (5)식과 동일하게 관계식을 얻을 수 있으며, 오리피스스를 통해 출입하는 유체에 대해 연속방정식을 적용하면 (6)식과 동일하게 식을 얻을 수 있다. 이때 팽창 시 유속  $v_{down}$ 으로 위쪽에서 오리피스에 유입되는 부위에 해당되는 챔버 단면적은 단면적  $A_{a2}$ 인 고압챔버 영역으로의 유체가 유입되었는지 여부와 관계없이  $A_{a1}$ 으로 가정하였다.

그러면 단일 완충기의 경우와 동일하게 압축 팽창 시 오리피스스로 유입되는 유체 속도  $v_{up}$ 과  $v_{down}$ 은 스트로크 변화율을 이용하여 (8)식과 동일하게 나타낼 수 있다. 또한 단일 완충기의 경우와 동일하게 오리피스 방출계수를 적용하여 (9)식을 얻을 수 있다.

한편 A형 2중 완충기의 2단이 작동하여 내부 격막③이 움직이고 있을 때 내부 격막③의 질량이 무시할 만큼 작다고 가정하고 마찰을 무시하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$P_{a1} = P_{a2} \quad (13)$$

이상을 결과를 종합하여 A형 2중 완충기의 2단 부분이 작동하고 있을 때 완충기 거동을 기술할 수 있는 방정식을 기술하면 Table 2와 같다. 이는 방정식 5개를 통해 미지수 ( $x_1, x_2, P_{a1}, P_{a2}, P_h$ )를 결정하는 문제로 생각될 수 있다. 이에 대한 수치적 연구는 후속연구[14]에 제시하였다.

Table 2. Mathematical model for A-type double-acting shock absorber

Find  $(x_1, x_2, P_{a1}, P_{a2}, P_h)$  with the given  $\dot{s}$

[A]  $\begin{cases} [x_1 + x_2 \geq c_2] & A_{a1}\dot{x}_1 + A_{a1}\dot{x}_2 + A_h\dot{s} = 0 \\ [x_1 + x_2 < c_2] & A_{a2}\dot{x}_1 + A_{a2}\dot{x}_2 + A_h\dot{s} = 0 \end{cases}$

[B]  $P_{a1} = P_{a1}(0) \left( \frac{V_{a1}(0)}{V_{a1}(x_1, x_2)} \right)^n$

[C]  $P_{a2} = P_{a2}(0) \left( \frac{V_{a2}(0)}{V_{a2}(x_2)} \right)^n$

[D]  $\begin{cases} [\dot{s} \geq 0 : \text{compression}] & P_h - P_{a1} = C\dot{s}^2 \\ [\dot{s} < 0 : \text{extension}] & P_{a1} - P_h = \hat{E}e^2(-\dot{s})^2 \end{cases}$

[E]  $P_{a1} = P_{a2}$

where  $\begin{cases} C = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left( \frac{A_h}{A_{orf1}} \right)^2 - 1 \right] \\ \hat{E} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left( \frac{A_{a1}}{\hat{A}_{orf1}} \right)^2 - 1 \right] \\ e = \frac{A_h}{A_{a1}} \end{cases}$

2.1.2 B형 올레오식 2중 완충기

Figure 6에는 B형 2중 완충기가 압축될 때 내부 유체의 움직임을 순차적으로 도시하고, 정식

화에 필요한 제원과 변수들을 나타내었다. A형 올레오식 2중 완충기와 달리, B형의 경우 저압의 가스 챔버는 위쪽에, 고압의 가스 챔버는 맨 아래 부분에 위치하고 있음을 알 수 있다. 제원과 변수는 앞서 A형 완충기와 동일한 표기법으로 정의하였다.

그리고  $x_h$  길이 변화는 유체가 오리피스를 통해 유입/유출되거나 유체가 하단 고압가스 챔버에서 혹은 고압가스 챔버로 유입되거나 유출되는 두 가지 요인에 의해 발생하므로, 이를 명확히 하기 위해 Fig. 6에  $\Delta x_{up}$ 과  $\Delta x_{down}$ 으로 각각 나타내었다. 이때  $\Delta x_{up}$ 과  $\Delta x_{down}$ 은 가운데 유체 챔버에서 빠져나갈 때 양의 부호를 갖고 가운데 유체 챔버로 들어갈 때 음의 부호를 갖는 것으로 정의하였다.

앞서와 유사하게 저압과 고압가스 챔버의 압력과 부피가 폴리트로픽 가정에 의해 (14)식으로 표현될 수 있으며, A형 2중 완충기와 달리 저압 챔버의 부피  $V_{a1}$ 이  $x_1$ 에 의해서만 결정됨을 알 수 있다.

$$\begin{cases} [\text{저압챔버}] & P_{a1} = P_{a1}(0) \left( \frac{V_{a1}(0)}{V_{a1}(x_1)} \right)^n \\ [\text{고압챔버}] & P_{a2} = P_{a2}(0) \left( \frac{V_{a2}(0)}{V_{a2}(x_2)} \right)^n \end{cases} \quad (14)$$

그리고 기하학적 관계로부터 (15)식을, 유체 질량 보존에 의해 (16)식을 얻을 수 있으며, (15)

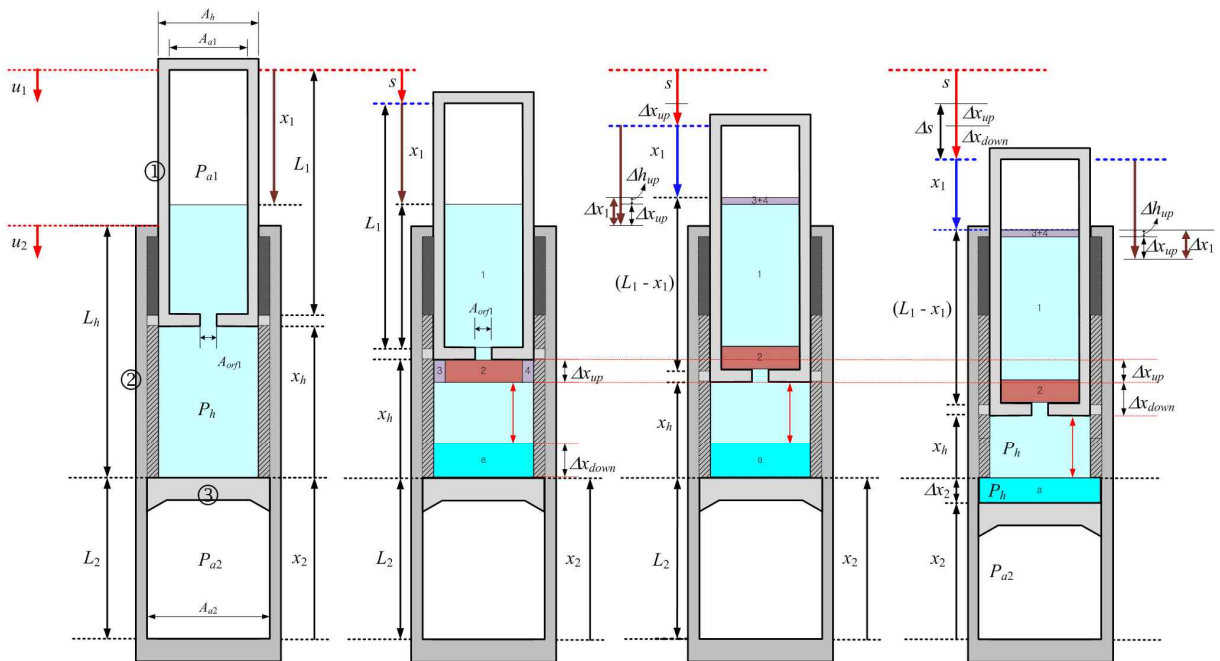


Fig. 6. Sequential behavior of type B double-acting oleo-pneumatic shock absorber

식의 미분과 (16)식의 미분을 이용하여 최종적으로 (17)식을 얻을 수 있다.

$$L_1 + L_2 + x_h + s = const \quad (15)$$

$$(L_1 - x_1)A_{a1} + x_h A_h + (L_2 - x_2)A_{a2} = const \quad (16)$$

$$\dot{x}_1 A_{a1} + \dot{x}_2 A_{a2} + \dot{s} A_h = 0 \quad (17)$$

다음으로 오리피스스를 통과하는 유체에 대해 베르누이 방정식을 적용하면 (18)식을 얻을 수 있다. 이때 단일 완충기나 A형 2중 완충기와 달리 오리피스스를 통한 유체의 상하운동은 단순히 스트로크 변화율  $\dot{s}$ 의 부호에 따라 정해지지 않고 압력 차에 의해 정해지게 됨에 유의해야 한다.

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] \\ P_h + \frac{1}{2} \rho v_{up}^2 = P_{a1} + \frac{1}{2} \rho v_{orf1}^2 \\ [P_{a1} > P_h] \\ P_h + \frac{1}{2} \rho \hat{v}_{orf1}^2 = P_{a1} + \frac{1}{2} \rho v_{down}^2 \end{cases} \quad (18)$$

오리피스 통과하는 유체에 대해 연속방정식을 적용하면 (6)식과 유사한 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] \quad v_{orf1} A_{orf1} = v_{up} A_h \\ [P_{a1} > P_h] \quad \hat{v}_{orf1} \hat{A}_{orf1} = v_{down} A_{a1} \end{cases} \quad (19)$$

Figure 6의 세 번째와 네 번째 그림에 도시된 바와 같이 2단 완충기가 작동할 때의 기하학적 관계로부터  $\Delta s = \Delta x_{up} + \Delta x_{down}$ 임을 알 수 있으며, 유체 챔버에서 고압가스 챔버로 유입되는 유량이 보존되어야하므로  $\Delta x_2 A_{a2} + \Delta x_{down} A_h = 0$ 임을 알 수 있다. (여기서  $\Delta x_{down}$ 이 양수인 경우는 가운데 유체 챔버에서 유체가 아래로 빠져나가는 경우이며, 이때 고압가스 챔버의 높이는 줄어들게 되므로  $\Delta x_2$ 는 음의 값을 가지게 된다.) 그러므로 (20), (21)식과 같은 관계가 성립하며, 이를 조합하면 (22)식이 성립함을 알 수 있다.

$$\dot{s} = \dot{x}_{up} + \dot{x}_{down} \quad (20)$$

$$\dot{x}_2 A_{a2} + \dot{x}_{down} A_h = 0 \quad (21)$$

$$\dot{x}_{up} = \dot{s} - \dot{x}_{down} = \dot{s} + \dot{x}_2 (A_{a2}/A_h) \quad (22)$$

한편  $P_h$ 가  $P_{a1}$ 보다 클 경우에 오리피스스를 통해  $\Delta x_{up} A_h$ 의 유량이 위로 유입되고  $\Delta x_{up}$ 은 양의 값을 가지며, 반대로  $P_h$ 가  $P_{a1}$ 보다 작을 경우에는 오리피스스를 통해  $(-\Delta x_{up} A_h)$ 의 유량이

가운데 유체 챔버로 유입되고  $\Delta x_{up}$ 은 음의 값을 가진다. 이 사실을 (19)식에 적용하면 다음 식이 만족됨을 알 수 있다.

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] \\ v_{orf1} A_{orf1} = v_{up} A_h = \dot{x}_{up} A_h \\ [P_{a1} > P_h] \\ \hat{v}_{orf1} \hat{A}_{orf1} = v_{down} A_{a1} = (-\dot{x}_{up} A_h) \end{cases} \quad (23)$$

(22)식의 결과를 (23)식에 대입하면 오리피스스를 통해 유입/유출되는 유체 속도를 스트로크 변화율  $\dot{s}$ 과 고압가스 챔버의 길이 변화율  $\dot{x}_2$ 로 (24-25)식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] \\ v_{up} = \dot{x}_{up} = \left( \dot{s} + \frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2 \right) \\ v_{orf1} = \frac{A_h}{A_{orf1}} \dot{x}_{up} = \frac{A_h}{A_{orf1}} \left( \dot{s} + \frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2 \right) \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} [P_{a1} > P_h] \\ v_{down} = (-) \frac{A_h}{A_{a1}} \dot{x}_{up} = (-) \frac{A_h}{A_{a1}} \left( \dot{s} + \frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2 \right) \\ \hat{v}_{orf1} = (-) \frac{A_h}{\hat{A}_{orf1}} \dot{x}_{up} = (-) \frac{A_h}{\hat{A}_{orf1}} \left( \dot{s} + \frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2 \right) \end{cases} \quad (25)$$

위 식에서  $P_h$ 가  $P_{a1}$ 보다 클 경우에  $\dot{x}_{up}$ 이 양의 값을 가지므로,  $\dot{s} + \dot{x}_2 (A_{a2}/A_h)$ 도 양의 값을 가지며,  $P_h$ 가  $P_{a1}$ 보다 작을 때는  $\dot{x}_{up}$ 이 음의 값을 가지므로,  $\dot{s} + \dot{x}_2 (A_{a2}/A_h)$ 도 음의 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 이는 단일 완충기나 A형 2중 완충기와 달리 오리피스스 주위의 유체 움직임이 단순히  $\dot{s}$ 에 의해 결정되지 않음을 의미한다.

그리고 오리피스스 방출계수와 함께 (24)식, (25)식을 베르누이 방정식 (18)에 적용하면 최종적으로 다음 형태의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] \\ P_h - P_{a1} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} [v_{orf1}^2 - v_{up}^2] \\ = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left( \frac{A_h}{A_{orf1}} \right)^2 - 1 \right] \left( \dot{s} + \frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2 \right)^2 \\ [P_{a1} > P_h] \\ P_{a1} - P_h = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} [v_{orf1}^2 - v_{down}^2] \\ = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left( \frac{A_{a1}}{\hat{A}_{orf1}} \right)^2 - 1 \right] \left( \frac{A_h}{A_{a1}} \right)^2 \left( -\dot{s} - \frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2 \right)^2 \end{cases} \quad (26)$$

**Table 3. Mathematical Model for B-type double-acting shock absorber**

Find $(x_1, x_2, P_{a1}, P_{a2}, P_h)$ with the given $\dot{s}$ [A] $\dot{x}_1 A_{a1} + \dot{x}_2 A_{a2} + \dot{s} A_h = 0$ [B] $P_{a1} = P_{a1}(0) \left( \frac{V_{a1}(0)}{V_{a1}(x_1)} \right)^n$ [C] $P_{a2} = P_{a2}(0) \left( \frac{V_{a2}(0)}{V_{a2}(x_2)} \right)^n$ [D] $\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] & P_h - P_{a1} = C(\dot{s} + \dot{x}_2 d)^2 \\ [P_{a1} > P_h] & P_{a1} - P_h = \hat{E} e^2 (-\dot{s} - \dot{x}_2 d)^2 \end{cases}$ [E] $P_h = P_{a2}$  where $\left[ \begin{array}{l} C = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left( \frac{A_h}{A_{orfl}} \right)^2 - 1 \right] \\ \hat{E} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left( \frac{A_{a1}}{\hat{A}_{orfl}} \right)^2 - 1 \right] \\ d = \frac{A_{a2}}{A_h}, \quad e = \frac{A_h}{A_{a1}} \end{array} \right]$
--

또한 유체와 고압가스 챔버를 구분하는 격막의 질량이 작아 무시할 수 있다고 가정하고 마찰을 무시하면 다음 관계를 얻을 수 있다.

$$P_h = P_{a2} \tag{27}$$

B형 2중 완충기의 2단 거동을 기술하기 위한 방정식을 정리하면 Table 3과 같으며, 수치적 연구는 후속 연구[14]에 제시하였다.

**2.1.3 C형 올레오식 2중 완충기**

C형 올레오식 2중 완충기의 고압가스 챔버가 작동할 때 상황을 필요 제원 및 변수와 함께 Fig. 7에 도시하였다. 앞서와 마찬가지로 기호 표기법을 사용하였으며, Fig. 7로부터 B형 2중 완충기와 다르게, 하단 고압가스 챔버와 중간 유체 챔버 사이에 하부 오리피스 존재하는 것을 확인할 수 있다.

저압과 고압가스 챔버의 압력은 폴리트로픽 가정 하에 B형 올레오식 2중 완충기와 동일한 (14)식으로 표현될 수 있으며, 기하학적 관계 및 유체 질량 보존식에 의해 B형 2중 완충기에서 성립하는 (15-17)식이 그대로 성립함을 알 수 있다. 그리고 고압가스 챔버 격막의 질량과 벽면과의 마찰력이 무시할 만하다는 가정 하에 Fig. 7 네 번째 형상에 도시된 고압가스 챔버의 압력  $P_{a2B}$ 와 하부 오리피스 아래의 유체 압력  $P_{a2}$ 는 같아지게 된다.

$$P_{a2B} = P_{a2} \tag{28}$$

하지만 B형과 달리 상부 오리피스 관계식 (29) 이외에 하부 오리피스 관계식 (30)을 아래와 같이 추가해야 한다. 이때 단일 완충기나 A형 2중 완충기와 달리, B형 2중 완충기와 유사하게 오리피스 주위의 유동방향이 단순히 스트로크 변화율  $\dot{s}$ 의 부호에 따라 정해지지 않고, 압력 차에 의해 정해지게 된다.

*Upper Orifice :*

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] \\ P_h + \frac{1}{2} \rho v_{up1}^2 = P_{a1} + \frac{1}{2} \rho v_{orf1}^2 \\ [P_{a1} > P_h] \\ P_h + \frac{1}{2} \rho \hat{v}_{orf1}^2 = P_{a1} + \frac{1}{2} \rho v_{down1}^2 \end{cases} \tag{29}$$

*Lower Orifice :*

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a2}] \\ P_h + \frac{1}{2} \rho v_{down2}^2 = P_{a2} + \frac{1}{2} \rho v_{orf2}^2 \\ [P_{a2} > P_h] \\ P_h + \frac{1}{2} \rho \hat{v}_{orf2}^2 = P_{a2} + \frac{1}{2} \rho v_{up2}^2 \end{cases} \tag{30}$$

이때 유체 챔버의 압력이 상단의 저압가스 챔버의 압력보다 높아 상부 오리피스를 통해 유체가 위로 올라가는 속도를  $v_{up1}$ 으로, 반대의 경우 상부 오리피스를 통해 유체가 아래로 내려가는 속도를  $v_{down1}$ 으로 표기하였다.

유사하게 유체 챔버의 압력이 하단의 고압가스 챔버의 압력보다 높아 하부 오리피스를 통해 유체가 아래로 내려가는 속도를  $v_{down2}$ 로, 반대로 하부 오리피스를 통해 유체가 위로 올라가는 속도를  $v_{up2}$ 로 표현하였다. 이 값들은 모두 양의 값을 가지며  $\dot{x}_{up}$  혹은  $\dot{x}_{down}$ 과는 다른 물리적 의미를 가지고 있다.

그리고 각각의 오리피스 출입 시 연속방정식을 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

*Upper Orifice :*

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] & v_{orf1} A_{orf1} = v_{up1} A_h \\ [P_{a1} > P_h] & \hat{v}_{orf1} \hat{A}_{orf1} = v_{down1} A_{a1} \end{cases} \tag{31}$$

*Lower Orifice :*

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a2}] & v_{orf2} A_{orf2} = v_{down2} A_h \\ [P_{a2} > P_h] & \hat{v}_{orf2} \hat{A}_{orf2} = v_{up2} A_{a2} \end{cases} \tag{32}$$



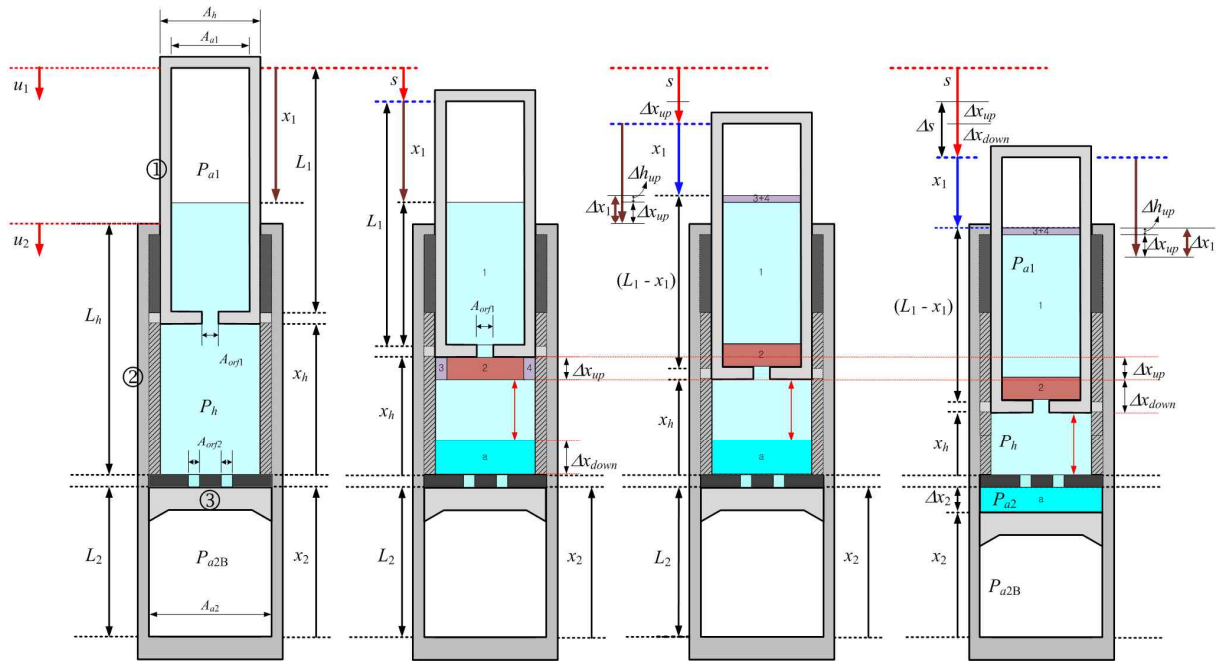


Fig. 7. Sequential behavior of type C double-acting oleo-pneumatic shock absorber

한편 B형 2중 완충기와 마찬가지로 Fig. 7의 세 번째와 네 번째 도시된 바와 같이 C형 완충기의 2단이 작동할 때도 기하학적 관계로부터  $\Delta s = \Delta x_{up} + \Delta x_{down}$  임을 알 수 있고, 유체 챔버에서 고압가스 챔버로 유입되는 유량이 보존되어야 한다는 사실로부터  $\Delta x_2 A_{a2} + \Delta x_{down} A_h = 0$  이어야 함을 알 수 있다. 그러므로 (20-22)식이 동일하게 적용될 수 있음을 알 수 있다.

그리고  $P_h$ 가  $P_{a1}$ 보다 클 경우에 오리피스를 통해  $\Delta x_{up} A_h$ 의 부피를 갖는 유량이 위로 유입되고  $\Delta x_{up}$ 은 양의 값을 가지며, 반대로  $P_h$ 가  $P_{a1}$ 보다 작을 경우는 오리피스를 통해  $(-\Delta x_{up} A_h)$ 의 부피를 갖는 유량이 가운데 유체 챔버로 유입되고  $\Delta x_{up}$ 은 음의 값을 가지게 된다. 이 사실을 상부 오리피스와 관련된 (31)식에 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

Upper Orifice :

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] v_{orf1} A_{orf1} = v_{up1} A_h = \dot{x}_{up} A_h \\ [P_{a1} \geq P_h] \hat{v}_{orf1} \hat{A}_{orf1} = v_{down1} A_{a1} = (-\dot{x}_{up} A_h) \end{cases} \quad (33)$$

한편 하부 오리피스의 경우에는  $P_h$ 가  $P_{a2}$ 보다 클 경우에 오리피스를 통해 부피  $\Delta x_{down} A_h$ 의 유량이 아래로 유입되고  $\Delta x_{down}$ 은 양의 값을 가지며, 반대로  $P_h$ 가  $P_{a2}$ 보다 작을 경우는 오리피

스를 통해 부피  $(-\Delta x_{down} A_h)$ 의 유량이 가운데 유체 챔버로 유입되고  $\Delta x_{down}$ 은 음의 값을 가지게 된다. 이를 하부 오리피스와 관련된 (32)식에 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

Lower Orifice :

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a2}] v_{orf2} A_{orf2} = v_{down2} A_h = (\dot{x}_{down} A_h) \\ [P_{a2} \geq P_h] \hat{v}_{orf2} \hat{A}_{orf2} = v_{up2} A_{a2} = (-\dot{x}_{down} A_h) \end{cases} \quad (34)$$

그리고 (22)식과 (21)식을 (33)식과 (34)식에 각각 대입하면 상부 오리피스와 하부 오리피스를 통해 유입되거나 유출되는 유속을 스트로크 변화율  $\dot{s}$ 과 고압가스 챔버 길이 변화율  $\dot{x}_2$ 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Upper Orifice :

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] \\ v_{up1} = \dot{x}_{up} = \left( \dot{s} + \frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2 \right) \\ v_{orf1} = \frac{A_h}{A_{orf1}} \dot{x}_{up} = \frac{A_h}{A_{orf1}} \left( \dot{s} + \frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2 \right) \\ [P_{a1} > P_h] \\ v_{down1} = (-) \frac{A_h}{A_{a1}} \dot{x}_{up} = (-) \frac{A_h}{A_{a1}} \left( \dot{s} + \frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2 \right) \\ \hat{v}_{orf1} = (-) \frac{A_h}{\hat{A}_{orf1}} \dot{x}_{up} = (-) \frac{A_h}{\hat{A}_{orf1}} \left( \dot{s} + \frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2 \right) \end{cases} \quad (35)$$

LowerOrifice :

$$\left\{ \begin{array}{l} [P_h \geq P_{a2}] \\ v_{down2} = \dot{x}_{down} = \left(-\frac{A_{a2}}{A_h}\right) \dot{x}_2 \\ v_{orf2} = \frac{A_h}{A_{orf2}} \dot{x}_{down} = \left(-\frac{A_{a2}}{A_{orf2}}\right) \dot{x}_2 \\ [P_{a2} > P_h] \\ v_{up2} = \left(-\frac{A_h}{A_{a2}}\right) \dot{x}_{down} = \dot{x}_2 \\ \hat{v}_{orf2} = \left(-\frac{A_h}{\hat{A}_{orf2}}\right) \dot{x}_{down} = \frac{A_{a2}}{\hat{A}_{orf2}} \dot{x}_2 \end{array} \right. \quad (36)$$

이때 상부 오리피스의 경우 B형 2중 완충기와 유사하게  $P_h$ 가  $P_{a1}$ 보다 클 경우에  $\dot{x}_{up}$ 이 양의 값을 가지므로,  $\dot{s} + \dot{x}_2(A_{a2}/A_h)$ 도 양의 값을 가지며,  $P_h$ 가  $P_{a1}$ 보다 작을 때는  $\dot{x}_{up}$ 이 음의 값을 가지므로,  $\dot{s} + \dot{x}_2(A_{a2}/A_h)$ 도 음의 값을 가지게 된다. 그리고 하부 오리피스의 경우에는  $P_h$ 가  $P_{a2}$ 보다 클 경우에  $\dot{x}_{down}$ 이 양의 값을 가지므로,  $\dot{x}_2$ 는 음의 값을 가지며,  $P_h$ 가  $P_{a2}$ 보다 작을 때는  $\dot{x}_{down}$ 이 음의 값을 가지므로,  $\dot{x}_2$ 는 양의 값을 가지게 된다. 이러한 하부 오리피스 거동은 C형 2중 완충기만의 특징이라고 할 수 있다. 그리고 오리피스 방출계수와 함께 상부 오리피스와 하부 오리피스에 관련된 (35)식과 (36)식을 각각 베르누이 방정식 (29)와 (30)에 대입하면 최종적으로 (37)식과 (38)식을 얻을 수 있다.

UpperOrifice :

$$\left\{ \begin{array}{l} [P_h \geq P_{a1}] \\ P_h - P_{a1} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} [v_{orf1}^2 - v_{up1}^2] \\ = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left(\frac{A_h}{A_{orf1}}\right)^2 - 1 \right] \left(\dot{s} + \frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2\right)^2 \\ [P_{a1} > P_h] \\ P_{a1} - P_h = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} [v_{orf1}^2 - v_{down1}^2] \\ = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left(\frac{A_{a1}}{\hat{A}_{orf1}}\right)^2 - 1 \right] \left(\frac{A_h}{A_{a1}}\right)^2 \left(\dot{s} + \frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2\right)^2 \end{array} \right. \quad (37)$$

LowerOrifice :

$$\left\{ \begin{array}{l} [P_h \geq P_{a2}] \\ P_h - P_{a2} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} [v_{orf2}^2 - v_{up2}^2] \\ = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left(\frac{A_h}{A_{orf2}}\right)^2 - 1 \right] \left(-\frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2\right)^2 \\ [P_{a2} > P_h] \\ P_{a2} - P_h = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} [v_{orf2}^2 - v_{down2}^2] \\ = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left(\frac{A_{a2}}{\hat{A}_{orf2}}\right)^2 - 1 \right] \left(\frac{A_h}{A_{a2}}\right)^2 \left(-\frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2\right)^2 \end{array} \right. \quad (38)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [P_{a2} > P_h] \\ P_{a2} - P_h = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} [v_{orf2}^2 - v_{down2}^2] \\ = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left(\frac{A_{a2}}{\hat{A}_{orf2}}\right)^2 - 1 \right] \left(\frac{A_h}{A_{a2}}\right)^2 \left(-\frac{A_{a2}}{A_h} \dot{x}_2\right)^2 \end{array} \right.$$

C형 2중 완충기 2단 작동 거동을 기술하기 위해 유도한 식들을 정리하여 나타내면 Table 4와 같다. 표에 정리된 바와 같이 주어진 스트로크 변화율  $\dot{s}$ 에 대해 다섯 개의 방정식을 이용하여 미지수  $x_1, x_2, P_{a1}, P_{a2}, P_h$ 를 결정하면, C형 2중 완충기의 거동을 기술할 수 있음을 알 수 있다. 이의 수치적 해법과 관련된 사항은 본 논문의 후속 연구[14]에 제시하였다.

### III. 결 론

본 논문에서는 세 가지 종류의 올레오식 2중 완충기 특성 비교를 위한 첫 단계 연구로서, 각

Table 4. Mathematical Model for C-type double-acting shock absorber

<p>Find <math>(x_1, x_2, P_{a1}, P_{a2}, P_h)</math> with the given <math>\dot{s}</math></p> <p>[A] <math>\dot{x}_1 A_{a1} + \dot{x}_2 A_{a2} + \dot{s} A_h = 0</math></p> <p>[B] <math>P_{a1} = P_{a1}(0) \left(\frac{V_{a1}(0)}{V_{a1}(x_1)}\right)^n</math></p> <p>[C] <math>P_{a2} = P_{a2}(0) \left(\frac{V_{a2}(0)}{V_{a2}(x_2)}\right)^n</math></p> <p>[D] <math>\left\{ \begin{array}{l} [P_h \geq P_{a1}] \quad P_h - P_{a1} = C(\dot{s} + \dot{x}_2 d)^2 \\ [P_{a1} &gt; P_h] \quad P_{a1} - P_h = \hat{E}(e)^2 (-\dot{s} - \dot{x}_2 d)^2 \end{array} \right.</math></p> <p>[E] <math>\left\{ \begin{array}{l} [P_h \geq P_{a2}] \quad P_h - P_{a2} = D(-\dot{x}_2 d)^2 \\ [P_{a2} &gt; P_h] \quad P_{a2} - P_h = \hat{F}(x_2)^2 \end{array} \right.</math></p> <p>where <math>\left( \begin{array}{l} C = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left(\frac{A_h}{A_{orf1}}\right)^2 - 1 \right] \\ \hat{E} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left(\frac{A_{a1}}{\hat{A}_{orf1}}\right)^2 - 1 \right] \\ D = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left(\frac{A_h}{A_{orf2}}\right)^2 - 1 \right] \\ \hat{F} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{C_d^2} \left[ \left(\frac{A_{a2}}{\hat{A}_{orf2}}\right)^2 - 1 \right] \\ d = \frac{A_{a2}}{A_h}, \quad e = \frac{A_h}{A_{a1}} \end{array} \right)</math></p>
---

완충기에 대한 수학적 모델링을 수행하였다. 세 종류 모두 처음에는 단일 완충기처럼 작동하다가 특정 조건에 다다른 시점부터 각 특성에 따라 완충기 2단이 작동하게 된다. 이에 논문의 완결성을 위해 먼저 올레오식 단일 완충기에 대한 모델을 제시한 후, A/B/C형 올레오식 2중 완충기에 대한 체계적 정식화 과정을 통해 주어진 스트로크 변화율에 대해 완충기 내부 상태를 기술할 수 있는 모델 방정식을 유도하였다.

수학적 모델링을 위해 오리피스 주위 유동 관계식의 구성 시 베르누이 방정식과 오리피스 방출계수를 이용하였으며, 완충기 내부의 기체와 유체는 각각 폴리트로픽 과정 그리고 비압축성으로 가정하였다. A형과 B형에서 유도된 모델식을 살펴보면 기하학적 관계식과 유량보존식으로부터 유도된 관계식[A], 폴리트로픽 가정 하에 유도된 가스 챔버의 압력과 부피사이의 관계식[B-C], 베르누이 방정식, 연속방정식 그리고 오리피스 방출계수를 이용하여 유도된 오리피스 관계식[D], 고압가스 챔버 격막 사이의 압력 관계식[E]로 이루어져 있음을 알 수 있다. 이에 비해 C형의 경우 [A-D]는 A/B형과 동일한 종류의 방정식이지만, 방정식 [E]의 경우 연속방정식과 오리피스 방출계수를 기반으로 유도된 하부 오리피스 관계식임을 확인할 수 있다. (C형 2중 완충기의 경우 고압가스 챔버 격막 사이의 압력 관계식 (28)은 정식화 중간 과정에서 적용하고 최종 모델 방정식에는 포함하지 않았다.)

또한 유도된 모델 방정식으로부터 A형 올레오식 2중 완충기는 올레오식 단일 완충기와 상당히 흡사한 형태를 가지며, 스트로크 변화율의 부호에 따라 오리피스 유동의 방향이 결정됨을 알 수 있었다. 하지만 이들과 달리 B형과 C형의 경우에는 오리피스 유동의 방향이 스트로크 변화율과 고압가스 챔버의 길이 변화율의 선형조합에 의해 결정됨을 알 수 있고, 특히 C형의 경우에는 하부 오리피스로 인해 다른 2중 완충기에 비해 완충기 상태를 모사하기 위한 모델 방정식의 구성이 달라짐을 알 수 있었다.

후속 연구[14]에서는 제안된 수학적 모델을 기반으로 A/B/C형 올레오식 2중 완충기의 거동을 수치적으로 해석하고 이를 통해 특성을 비교 분석하였다. 향후 본 연구에서 제안된 모델을 항공기 올레오식 완충기의 설계해석 과정에 적극 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

## 후 기

본 연구는 인하대학교의 지원으로 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## References

- 1) Currey, N. S., *Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices*, AIAA Education Series, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington, D. C., 1988.
- 2) Milwitzky, B., and Cook, F. E., *Analysis of Landing Gear Behavior*, National Advisory Committee for Aeronautics Technical Report 1154, January 1953.
- 3) Daniels, J. N., *A Method for Landing Gear Modeling and Simulation with Experimental Validation*, National Aeronautics and Space Administration Contractor Report 201601, June 1996.
- 4) Park, I. K., Choi, S. W., and Jang, J. W., "Impact Analysis of Oleo-pneumatic Nose Strut for Light Aircraft," *Aerospace Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 1, July 2007, pp. 19~28.
- 5) Shin, J. W., Kim, T. U., and Hwang, I. H., "Dynamic Load Analysis of Aircraft Landing Gear," *Journal of The Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 16, No. 1, January 2008, pp. 1~6.
- 6) Kim, S. G., Kim, C., and Kim, M., "Dynamic Behaviors and Optimal Design of an Aircraft Nose Landing Gear using ADAMS," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 35, No. 7, January 2007, pp. 612~618.
- 7) Lee, K. B., Jeong, S. H., Cho, J. Y., Kim, J. H., and Park, C. Y., "Hard-Landing Simulation by a Hierarchical Aircraft Landing Model and an Extended Inertial Relief Technique," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 16, No. 3, September 2015, pp. 394~406.
- 8) Melik-Zade, N. A., "The Operation of a Two-Chamber Pneudraulic Shock Absorber," FTD-MT-24-964-72, Foreign Technology Division, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, January 1973. (Translated from Russian, *Mashinovedeniye*, No. 2, 1971, pp. 44~50.)
- 9) Nie, H., Qiao, X., Gao, Z., and Zhou, L., "Dynamic Behavior Analysis for Landing Gear with Different Types of Dual-Chamber Shock-Struts," *Chinese Journal of Aeronautics*,

Vol. 4, No. 2, 1991, pp. 235~244.

10) Nie, H., Lim, K. H., Hwang, J. H., and Kim, D. M., "Dynamic Behavior of Aircraft Landing Gear with Typical Dual-Chamber Shock-Absorbers", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 25, No. 4, August 1997, pp. 142~152.

11) Terze, Z., Vrdoljak, M., and Wolf, H., "Numerical Simulation of Landing Aircraft Dynamics," *Strojarsvo*, Vol. 51, No. 6, 2009, pp. 657~665.

12) Lee, Y. K., and Kim, K. J., "Ground Resonance Analysis for an Eight-Degrees-of-Freedom Rotorcraft with Double-Stage Oleo-Pneumatic Shock Absorbers," *Journal of Aircraft*, Vol. 47, No. 5, September 2010, pp. 1647~1655.

13) Jeong, S. H., Cho, J. Y., Kim, J. H., and

Park, C. Y., "Calculation of Internal Force and Analysis of a Double-Acting Shock Absorber," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, April 2015, pp. 284~288.

14) Lee, C. S., Jeong, S. H., Kim, K. J., Kim, J. H., and Cho, J. Y., "Comparative Study on the Several Types of Double-Acting Oleo-Pneumatic Shock Absorbers of Aircraft: Part II. Numerical Analysis and Comparison," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 45 No. 11, 2017, pp. 951~966.

15) Val Wylen, G. J., and Sonntag, R. E., *Fundamentals of Classical Thermodynamics, 3rd Ed*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1985.

16) White, F. H., *Fluid Mechanics, 2nd Ed*, McGraw-Hill, New York, 1986.