

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(11), 951-966(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.11.951

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

## 항공기 올레오식 2중 완충기 종류에 따른 특성 비교 연구

## Part II. 수치해석 및 비교

정선호\*, 이철순\*, 김정호\*, 조진연\*\*

Comparative Study on the Several Types of Double-Acting  
Oleo-Pneumatic Shock Absorbers of Aircraft  
Part II. Numerical Analysis and Comparison

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

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

## ABSTRACT

In this work, numerical analyses are carried out and the behaviors are investigated for three types of double-acting oleo-pneumatic shock absorbers along with the mathematical models proposed in the part I of this work. After presenting each numerical algorithm corresponding to each model, the numerical algorithms are implemented as user-subroutines in MSC/ADAMS commercial multi-body dynamic software. By using the developed user-subroutines, numerical studies are carried out for compression/stretch test as well as drop test. From the comparative studies, we investigated the salient feature of each double-acting oleo-pneumatic shock absorber. Results identifies that it is possible to increase the absorbing efficiency in accordance with the requirements for aircraft landing conditions.

## 초 록

본 연구에서는 세 가지 종류의 올레오식 2중 완충기 특성 비교를 위해 첫 단계 연구에서 제안한 수학적 모델을 이용하여 수치해석을 수행하고 완충 특성을 비교하였다. 각 올레오식 2중 완충기 모델에 대해 수치해석 알고리즘을 제시하였으며, 이를 MSC/ADAMS 상용 다물체 동역학 해석 소프트웨어의 사용자 서브루틴으로 구현하였다. 구현된 사용자 서브루틴을 활용하여 압축/신장시험 및 낙하시험에 대한 각종 수치해석을 수행하였으며, 해석 결과의 비교 분석을 통해 올레오식 2중 완충기 유형에 따른 완충거동 특성을 고찰하였다. 또한 결과로부터 항공기 착륙 요구조건에 맞추어 적절한 내부형상 변경 및 완충기 종류 선정을 통해 올레오식 완충기의 충격흡수 성능을 높일 수 있음을 확인하였다.

**Key Words :** Double-Acting Oleo-Pneumatic Shock Absorber(올레오식 2중 완충기), User-Subroutine(사용자 서브루틴), Drop Test(낙하시험), Aircraft Landing Gear(항공기 착륙 장치), Landing Conditions(착륙 조건)

† Received : August 3, 2017      Revised : September 23, 2017      Accepted : September 26, 2017

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

## I. 서론

항공기 착륙 장치(aircraft landing gear)는 이 착륙 시 발생하는 충격하중 등을 흡수하는 아주 중요한 장치로서, 올레오식 완충기는 그 뛰어난 충격흡수성능으로 인해 중대형 항공기 착륙장치에 널리 사용되고 있다. 이를 크게 분류하면 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. 주로 올레오식 단일 완충기는 주 착륙장치(main landing gear)에, 올레오식 2중 완충기는 앞진 착륙 장치(nose landing gear)에 활용되고 있다[1].

항공기 착륙장치는 이착륙 요구조건에 따라 최대한 효율적으로 하중을 흡수할 수 있도록 설계해야 하며, 이를 위해서는 완충기 거동에 대한 정확한 예측이 필수적이다.

물론 그간 항공기 올레오식 완충기 거동을 예측하기 위해 많은 연구가 수행된 바 있다. 하지만 대부분 연구가 주로 올레오식 단일 완충기에 대해 수행되었으며[2-10], 올레오식 2중 완충기에 대해 연구된 경우는 참고문헌[11]에서 지적한 바와 같이 국내외적으로도 [12-17]의 연구가 대부분일 정도로 매우 미진한 실정이다.

이에 본 논문에서는 첫 단계 연구[11]에서 제안한 세 가지 올레오식 2중 완충기 모델 방정식을 기반으로 수치해석 알고리즘을 구성하고, 사용자 서브루틴을 구현하여 완충기 거동을 해석하였다. 세 가지 올레오식 2중 완충기에 대해 속도 및 질량 조건을 달리해가며 압축/신장시험 및 낙하시험에 대한 거동을 수치적으로 해석하였으며, 해석 결과의 비교 분석을 통해 올레오식 2중 완충기 형태에 따른 완충거동 특성을 고찰하였다.

## II. 본론

### 2.1 올레오식 완충기 수치해석 알고리즘

올레오식 2중 완충기는 저압/고압 챔버의 위치, 오리피스스의 구성 등에 따라 첫 단계 연구 [11]에서 언급한 바와 같이 Fig. 1의 A/B/C형 등으로 분류할 수 있다.

A형은 고압과 저압의 가스 챔버가 이웃해 있는 반면에, B형과 C형은 양 끝단에 저압가스 챔버와 고압가스 챔버가 위치하고 있다.

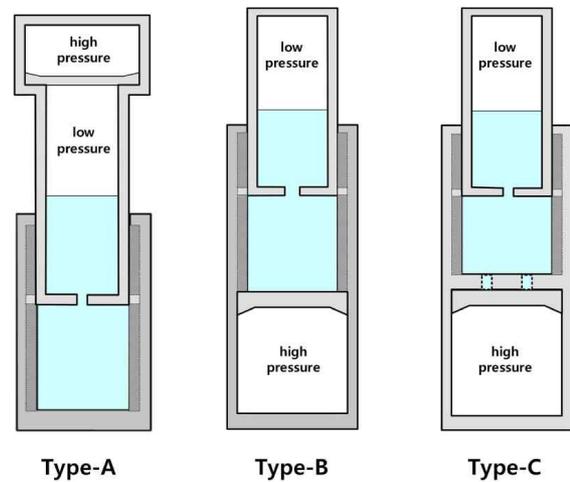


Fig. 1. Three types of double-acting oleo shock absorbers[11]

그리고 특히 C형의 경우에는 A형이나 B형과 달리 오리피스스가 상부와 하부에 이중으로 존재하는 특징을 가지고 있다.

본 절에서는 이상의 세 가지 올레오식 2중 완충기에 대해 첫 단계 연구[11]에서 제안한 모델 방정식을 기반으로 주어진 입력 조건에 대해 완충기 내부 압력  $P_h$ 와 가스 챔버 높이 변화율  $x_1, x_2$ 를 결정할 수 있는 알고리즘을 구성하였다.

이때 입력 조건으로는 완충기 상하부 거동 속도  $u_1, u_2$ 에 따라 결정되는 스트로크 변화율  $s$ 과 가스 챔버 높이  $x_1, x_2$ 를 선정하였으며, 전개 과정에 필요한 수식에는 모두 첫 단계 연구[11]과 동일한 변수와 계수를 사용하였다.

#### 2.1.1 올레오식 단일 완충기

첫 단계 연구[11]에서 언급한 바와 같이 세 가지 2중 완충기는 고압가스 챔버가 작동하기 이전에는 모두 단일 완충기처럼 작동하며, 고압가스 챔버가 작동하면 거동이 각기 달라지게 된다.

그러므로 올레오식 2중 완충기 거동은 고압가스 챔버가 작동하기 이전에는 단일 완충기로, 고압가스 챔버가 작동한 이후부터는 각각의 특성에 따라 고압 챔버 및 오리피스스의 영향을 고려하여 해석해야 한다.

이에 본 절에서는 우선적으로 올레오식 단일 완충기 거동을 모사할 수 있는 알고리즘을 구성하였다. 수학적 모델은 첫 단계 연구[11]에서 유도한 바와 같이 (1-3)식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}_1 A_{a1} + \dot{s} A_h = 0 \tag{1}$$

$$P_{a1} = P_{a1}(0) \left( \frac{x_1(0) A_{a1}}{x_1 A_{a1}} \right)^n \tag{2}$$

**Table 1. Numerical algorithm for single-acting shock absorber**

|   |
|---|
| For the given $\dot{s}$ with the known values $[s, x_1]$ ,<br><br>Compute<br><br>$P_{a1}^* = P_{a1}(0) \left( \frac{x_1(0)A_{a1}}{x_1 A_{a1}} \right)^n$<br><br>Algorithm [S]<br><br><div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;">                     S1) <math>N_{stage} = 1</math><br/><br/>                     S2) <math>\begin{cases} [\dot{s} \geq 0] P_h^* = P_{a1}^* + C \dot{s}^2 \\ [\dot{s} &lt; 0] P_h^* = P_{a1}^* - \hat{E}e^2(-\dot{s})^2 \end{cases}</math><br/><br/>                     S3) <math>\dot{x}_1^* = \left( -\frac{A_h}{A_{a1}} \right) \dot{s}</math> </div><br><br>Return the outputs $[x_1, P_h] = [x_1^*, P_h^*]$ |
|---|

$$\begin{cases} [\dot{s} \geq 0 : compression] P_h - P_{a1} = C \dot{s}^2 \\ [\dot{s} < 0 : extension] P_{a1} - P_h = \hat{E}e^2(-\dot{s})^2 \end{cases} \quad (3)$$

이때 스트로크 변화율  $\dot{s}$ 과 함께 가스 챔버 부피를 기술하기 위한 완충기 내부변수  $x_1$ 이 주어졌을 때 유체챔버의 압력  $P_h$ 와 내부변수 변화율  $\dot{x}_1$ 을 결정할 수 있는 알고리즘을 구성하면 Table 1과 같고, 이를 통해 완충기에 발생하는 내력도 결정할 수 있다. 여기서  $N_{stage}$ 는 1단 작동상태인지 2단 작동상태인지를 알려주는 일종의 상태변수로서, 이 경우에 있어서는 그 값을 1로 갖게 된다.

**2.1.2 A형 올레오식 2중 완충기**

A형 올레오식 2중 완충기의 2단 거동을 기술하는 수학적 모델은 [11]에서 유도한 바와 같이 아래 식 (4-8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} [x_1 + x_2 \geq c_2] A_{a1}\dot{x}_1 + A_{a1}\dot{x}_2 + A_h\dot{s} = 0 \\ [x_1 + x_2 < c_2] A_{a2}\dot{x}_1 + A_{a2}\dot{x}_2 + A_h\dot{s} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$P_{a1} = P_{a1}(0) \left( \frac{V_{a1}(0)}{V_{a1}(x_1, x_2)} \right)^n \quad (5)$$

$$P_{a2} = P_{a2}(0) \left( \frac{V_{a2}(0)}{V_{a2}(x_2)} \right)^n \quad (6)$$

$$\begin{cases} [\dot{s} \geq 0 : compression] P_h - P_{a1} = C \dot{s}^2 \\ [\dot{s} < 0 : extension] P_{a1} - P_h = \hat{E}e^2(-\dot{s})^2 \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{a1} = P_{a2} \quad (8)$$

정식화 연구[11]에서 언급한 바와 같이 A형 2

중 완충기의 2단 거동은 저압가스 챔버의 압력이 점차 증가하여 고압가스 챔버의 압력과 동일해지는 때부터 시작되며, 2단 거동이 진행되고 있을 때는 저압가스 챔버와 고압가스 챔버의 압력이 동일하게 된다. (8)식은 이러한 물리적 상황을 의미하며, 이로 인해 2단 작동 시 두 가스 챔버의 압력을 나타내는 (5)식과 (6)식은 서로 같아지고, 그 미분도 서로 같아지게 된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{V}_{a1}(x_1, x_2) = \left( \frac{C_{pv1}}{C_{pv2}} \right) \dot{V}_{a2}(x_2) \quad (9)$$

$$\begin{cases} C_{pv1} \equiv (P_{a1}(0))^{(1/n)} V_{a1}(0) \\ C_{pv2} \equiv (P_{a2}(0))^{(1/n)} V_{a2}(0) \end{cases}$$

이때 저압가스 챔버와 고압가스 챔버의 부피는 이론 연구[11]의 Fig. 5로부터  $(x_1+x_2)$ 의 크기에 따라 (10)식과 같이 구분하여 표현할 수 있으며, 이를 미분하면 (11)식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} [If (x_1 + x_2) \geq c_2] \\ V_{a1}(x_1, x_2) = (x_1 + x_2 - c_2)A_{a1} + (c_2 - x_2)A_{a2} \\ V_{a2}(x_2) = x_2 A_{a2} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} [If (x_1 + x_2) < c_2] \\ V_{a1}(x_1, x_2) = x_1 A_{a2} \\ V_{a2}(x_2) = x_2 A_{a2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} [If (x_1 + x_2) \geq c_2] \\ \dot{V}_{a1}(x_1, x_2) = (\dot{x}_1 + \dot{x}_2)A_{a1} - (\dot{x}_2)A_{a2} \\ \dot{V}_{a2}(x_2) = \dot{x}_2 A_{a2} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} [If (x_1 + x_2) < c_2] \\ \dot{V}_{a1}(x_1, x_2) = \dot{x}_1 A_{a2} \\ \dot{V}_{a2}(x_2) = \dot{x}_2 A_{a2} \end{cases}$$

그리고 (11)식을 (9)식에 대입하면 다음과 같이 가스 챔버 높이 변화율  $\dot{x}_1$ 과  $\dot{x}_2$  사이의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} [If (x_1 + x_2) \geq c_2] \\ \dot{x}_1 = \left( \frac{C_{pv1}}{C_{pv2}} \right) \frac{A_{a2}}{A_{a1}} \dot{x}_2 + \frac{A_{a2}}{A_{a1}} \dot{x}_2 - \dot{x}_2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} [If (x_1 + x_2) < c_2] \\ \dot{x}_1 = \left( \frac{C_{pv1}}{C_{pv2}} \right) \dot{x}_2 \end{cases}$$

(12)식을 (4)식에 대입하면  $(x_1+x_2)$ 의 크기와 관계없이 (13)식과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\left( \frac{C_{pv1}}{C_{pv2}} + 1 \right) A_{a2}\dot{x}_2 + A_h\dot{s} = 0 \quad (13)$$

**Table 2. Numerical algorithm for A-type double-acting shock absorber**

|   |
|---|
| <p>For the given <math>\dot{s}</math> with the known values <math>[s, x_1, x_2]</math>,<br/>Compute</p> $P_{a1}^* = P_{a1}(0) \left( \frac{V_{a1}(0)}{V_{a1}(x_1, x_2)} \right)^n$ $P_{a2}^* = P_{a2}(0) \left( \frac{V_{a2}(0)}{V_{a2}(x_2)} \right)^n$ <p>If <math>(P_{a2}^* \geq P_{a1}^*</math> and <math>x_2 \geq c_2)</math></p> <p>Algorithm [S]</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;"> <p>S1) <math>Nstage = 1</math></p> <p>S2) <math>\begin{cases} [\dot{s} \geq 0] P_h^* = P_{a1}^* + C \dot{s}^2 \\ [\dot{s} &lt; 0] P_h^* = P_{a1}^* - \hat{E}e^2(-\dot{s})^2 \end{cases}</math></p> <p>S3) <math>\dot{x}_1^* = \left( -\frac{A_h}{A_{a1}} \right) \dot{s}</math></p> <p>S4) <math>\dot{x}_2^* = 0</math></p> </div> <p>Else</p> <p>Algorithm [A]</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;"> <p><math>Nstage = 2</math></p> <p><math>\begin{cases} [\dot{s} \geq 0] P_h^* = P_{a1}^* + C \dot{s}^2 \\ [\dot{s} &lt; 0] P_h^* = P_{a1}^* - \hat{E}e^2(-\dot{s})^2 \end{cases}</math></p> <p><math>\dot{x}_2^* = \left( -\frac{C_{pv2} A_h}{(C_{pv1} + C_{pv2}) A_{a2}} \right) \dot{s}</math></p> <p><math>\begin{cases} [x_1 + x_2 \geq c_2] \\ \dot{x}_1^* = -(A_{a1} \dot{x}_2^* + A_h \dot{s}) / A_{a1} \\ [x_1 + x_2 &lt; c_2] \\ \dot{x}_1^* = -(A_{a2} \dot{x}_2^* + A_h \dot{s}) / A_{a2} \end{cases}</math></p> </div> <p>End</p> <p>Return the outputs <math>[x_1, x_2, P_h] = [x_1^*, x_2^*, P_h^*]</math></p> |
|---|

(13)식을 이용하여 주어진  $\dot{s}$ 에 대해  $x_2$ 을 얻을 수 있으며, 다시 (4)식을 이용하여  $x_1$ 을 얻을 수 있다. 이를 정리하면 단일 완충기와 유사하게 Table 2와 같은 알고리즘을 얻을 수 있다.

완충기 1단/2단 거동은 알고리즘에서 알 수 있는 바와 같이  $P_{a2}^*$ 가  $P_{a1}^*$ 보다 크거나 같고  $x_2$ 가 제한조건인  $c_2$ 보다 크거나 같으면 1단 거동으로, 그렇지 않으면 2단 거동으로 판단하였다.

**2.1.3 B형 올레오식 2중 완충기**

B형 2중 완충기의 2단 거동을 기술하는 수학적 모델은 (14-18)식으로 기술될 수 있다[11].

$$\dot{x}_1 A_{a1} + \dot{x}_2 A_{a2} + \dot{s} A_h = 0 \tag{14}$$

$$P_{a1} = P_{a1}(0) \left( \frac{V_{a1}(0)}{V_{a1}(x_1)} \right)^n \tag{15}$$

$$P_{a2} = P_{a2}(0) \left( \frac{V_{a2}(0)}{V_{a2}(x_2)} \right)^n \tag{16}$$

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] P_h - P_{a1} = C(\dot{s} + \dot{x}_2 d)^2 \\ [P_{a1} > P_h] P_{a1} - P_h = \hat{E}e^2(-\dot{s} - \dot{x}_2 d)^2 \end{cases} \tag{17}$$

$$P_h = P_{a2} \tag{18}$$

스트로크 변화를  $\dot{s}$ 과 가스 챔버 높이  $x_1$ 과  $x_2$ 가 주어져 있는 상태에서 (15)식과 (16)식을 이용하여  $P_{a1}$ 과  $P_{a2}$ 를 구한 후, (18)식을 이용하면  $P_h$ 를 얻을 수 있다.  $x_2$ 는 (17)식과 함께  $P_h \geq P_{a1}$  일 경우에는  $(\dot{s} + \dot{x}_2 d)$ 가 '0' 또는 양수, 그렇지 않을 경우에는 음수가 된다는 사실을 적용하여 얻을 수 있다. 최종적으로 앞서 구한  $x_2$  값과 주어진  $\dot{s}$  값을 (14)식에 대입하면  $x_1$ 을 구할 수 있다. 이상의 내용을 알고리즘으로 나타내면 Table 3과 같다.

이때 두 가스챔버의 압력을 비교하여 몇 단 거동인지 판별하는 A형과 달리, B형과 C형의 경우에는 유체챔버와 고압 가스챔버의 압력을 비교하여 1단/2단 거동을 판별하게 된다. 그리고  $P_{a1}^*$ 과  $P_{a2}^*$ 는 새로 구한 값을 사용하는데 반해, 비교 대상인  $P_h^{Det}$ 는 이전 단계에서 구한 값을 사용하게 된다. 이로 인해 단 변화가 발생하는 시점의 경우 이전 단계의 값인  $P_h^{Det}$ 를 통해 단 거동을 예측하고 이를 통해서 다시 구한 압력  $P_h^*$ 가 단 거동을 판별하는 판별식을 만족하지 않을 수 있다. 그러므로 이를 다시 보정할 수 있도록 보정 알고리즘을 추가하였다.

다만 내재적 시간적분법의 경우 수렴성 문제가 발생하지 않도록 2단에서 1단으로 변환되는 경우에는  $x_1$ 과  $x_2$ 을 보정하지 않고 첫 예측 단계 값을 그대로 사용하였다. 만일 2단에서 1단으로 변환되는 경우 S3)과 S4)식을 이용하여  $x_1$ 과  $x_2$ 를 보정하게 되면,  $x_2$ 가 '0'이 되어 다음 단계에서  $x_2$ 가 변하지 않게 되고, 결국  $P_{a2}^*$ 가 전 단계와 동일해지면서 반복계산 시 수치해가 수렴하지 않고 진동하게 되는 현상이 발생할 수 있으므로 주의를 기울여야 한다.

**2.1.4 C형 올레오식 2중 완충기**

C형 2중 완충기의 2단 거동을 기술하는 수학적 모델은 (19-23)식으로 기술될 수 있다.

$$\dot{x}_1 A_{a1} + \dot{x}_2 A_{a2} + \dot{s} A_h = 0 \tag{19}$$

**Table 3. Numerical algorithm for B-type double-acting shock absorber**

|   |
|---|
| At the initial computation, set $P_h^{Det} \equiv P_{a1}(0)$<br>For the given $s$ and the known values<br>$[s, x_1, x_2, P_h^{Det}]$<br>Compute<br>$P_{a1}^* = P_{a1}(0) \left( \frac{V_{a1}(0)}{V_{a1}(x_1)} \right)^n$ $P_{a2}^* = P_{a2}(0) \left( \frac{V_{a2}(0)}{V_{a2}(x_2)} \right)^n$ If $(P_{a2}^* \geq P_h^{Det} \text{ and } x_2 \geq L_2)$<br>Algorithm [S]<br><div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;">                     S1) <math>Nstage = 1</math><br/>                     S2) <math>\begin{cases} [\dot{s} \geq 0] &amp; P_h^* = P_{a1}^* + C \dot{s}^2 \\ [\dot{s} &lt; 0] &amp; P_h^* = P_{a1}^* - \hat{E}e^2(-\dot{s})^2 \end{cases}</math><br/>                     S3) <math>\dot{x}_1^* = \left( -\frac{A_h}{A_{a1}} \right) \dot{s}</math><br/>                     S4) <math>\dot{x}_2^* = 0</math> </div> Else<br>Algorithm [B]<br><div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;"> <math>Nstage = 2</math><br/> <math>P_h^* = P_{a2}^*</math><br/> <math>\begin{cases} [P_h^* \geq P_{a1}^*] \\ \dot{x}_2^* = [\sqrt{(P_h^* - P_{a1}^*) / C} - \dot{s}] / d \\ [P_{a1}^* &gt; P_h^*] \\ \dot{x}_2^* = [-\sqrt{(P_{a1}^* - P_h^*) / (\hat{E}e^2)} - \dot{s}] / d \\ \dot{x}_1^* = -(\dot{x}_2^* A_{a2} + \dot{s} A_h) / A_{a1} \end{cases}</math> </div> End<br>If $(Nstage=1 \text{ and } P_{a2}^* < P_h^*)$<br>Algorithm [B]<br>End<br>If $(Nstage=2 \text{ and } P_{a2}^* \geq P_h^* \text{ and } x_2 \geq L_2)$<br>Algorithm [S1], [S2]<br>If (Explicit time integration)<br>Algorithm [S3], [S4]<br>End<br>End<br>$P_h^{Det} = P_h^*$<br>$[x_1, x_2, P_h] = [x_1^*, x_2^*, P_h^*]$<br>Return the outputs $[x_1, x_2, P_h, P_h^{Det}]$ |
|---|

$$P_{a1} = P_{a1}(0) \left( \frac{V_{a1}(0)}{V_{a1}(x_1)} \right)^n \tag{20}$$

$$P_{a2} = P_{a2}(0) \left( \frac{V_{a2}(0)}{V_{a2}(x_2)} \right)^n \tag{21}$$

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] & P_h - P_{a1} = C(\dot{s} + \dot{x}_2 d)^2 \\ [P_{a1} > P_h] & P_{a1} - P_h = \hat{E}(e)^2(-\dot{s} - \dot{x}_2 d)^2 \end{cases} \tag{22}$$

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a2}] & P_h - P_{a2} = D(-\dot{x}_2 d)^2 \\ [P_{a2} > P_h] & P_{a2} - P_h = \hat{F}(\dot{x}_2)^2 \end{cases} \tag{23}$$

이때 정식화 연구[11]에서 언급한 바와 같이  $P_h, P_{a1}, P_{a2}$  압력의 크기에 따라 다음 관계를 갖게 된다.

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1}] & (\dot{s} + \dot{x}_2 d) \geq 0 \\ [P_{a1} \geq P_h] & (-\dot{s} - \dot{x}_2 d) \geq 0 \end{cases} \tag{24}$$

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a2}] & (-\dot{x}_2) \geq 0 \\ [P_{a2} \geq P_h] & (\dot{x}_2) \geq 0 \end{cases} \tag{25}$$

B형 올레오식 2중 완충기와 달리 C형 올레오식 2중 완충기의 경우에는  $P_h$ 가  $P_{a2}$ 와 일반적으로 동일하지 않기 때문에  $P_{a2}$ 가 결정되더라도  $x_2$ 와 함께  $P_h$ 를 결정해야한다. 이를 위해 우선  $P_{a1}=P_{a2}, P_{a1}>P_{a2}, P_{a2}>P_{a1}$ 인 경우로 구분한 후,  $P_h$ 의 크기에 따라 다시 이들을 각각 다음과 같이 세분화하도록 하자.

여기서  $P_{a1}=P_{a2}$ 의 세분화된 경우를  $P_{a1}>P_{a2}$ 의 세분화된 경우와 합치면 총 여섯 가지 세분화된 경우를 얻을 수 있고, 이 경우에 대해 (24)와 (25)의 부등식을 활용하여 (22)식과 (23)식을 다시 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} [P_{a1} = P_{a2}] & \begin{cases} P_h \geq P_{a1} = P_{a2} \\ P_{a1} = P_{a2} > P_h \end{cases} \\ [P_{a1} > P_{a2}] & \begin{cases} P_h \geq P_{a1} > P_{a2} \\ P_{a1} > P_h \geq P_{a2} \\ P_{a1} > P_{a2} > P_h \end{cases} \\ [P_{a2} > P_{a1}] & \begin{cases} P_h \geq P_{a2} > P_{a1} \\ P_{a2} > P_h \geq P_{a1} \\ P_{a2} > P_{a1} > P_h \end{cases} \end{cases} \tag{26}$$

$$\begin{cases} [P_h \geq P_{a1} \geq P_{a2}] \\ \sqrt{\frac{P_h - P_{a1}}{C}} + \sqrt{\frac{P_h - P_{a2}}{D}} = \dot{s} \end{cases} \tag{27}$$

$$\begin{cases} [P_{a1} > P_h \geq P_{a2}] \\ -\sqrt{\frac{P_{a1} - P_h}{\hat{E}e^2}} + \sqrt{\frac{P_h - P_{a2}}{D}} = \dot{s} \end{cases} \tag{28}$$

$$\begin{cases} [P_{a1} \geq P_{a2} > P_h] \\ -\sqrt{\frac{P_{a1} - P_h}{\hat{E}e^2}} - d\sqrt{\frac{P_{a2} - P_h}{\hat{F}}} = \dot{s} \end{cases} \tag{29}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [P_h \geq P_{a2} > P_{a1}] \\ \sqrt{\frac{P_h - P_{a1}}{C}} + \sqrt{\frac{P_h - P_{a2}}{D}} = \dot{s} \end{array} \right. \quad (30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [P_{a2} > P_h \geq P_{a1}] \\ \sqrt{\frac{P_h - P_{a1}}{C}} - d\sqrt{\frac{P_{a2} - P_h}{\hat{F}}} = \dot{s} \end{array} \right. \quad (31)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [P_{a2} > P_{a1} > P_h] \\ -\sqrt{\frac{P_{a1} - P_h}{\hat{E}e^2}} - d\sqrt{\frac{P_{a2} - P_h}{\hat{F}}} = \dot{s} \end{array} \right. \quad (32)$$

여기서 (27-29)식은  $P_{a1} \geq P_{a2}$ 의 경우에 해당되고, (30-32)식은  $P_{a2} > P_{a1}$ 인 경우에 해당된다. 그리고  $P_{a1} \geq P_{a2}$ 인 경우는 아래 Fig. 2에 도시한 그래프와 같이,  $P_{a2} > P_{a1}$ 인 경우는 Fig. 3에 도시한 그래프와 같이  $\dot{s}$ 를  $P_h$ 의 함수로 표현할 수 있다.

두 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두 경우 모두 함수는 단조증가 함수 꼴을 가짐을 알 수 있으며, 이로부터  $\dot{s}$ 은  $P_h$ 로부터,  $P_h$ 는  $\dot{s}$ 으로부터 일의적으로 결정됨을 알 수 있다. 즉 주어진  $\dot{s}$ 에 대해 방정식을 만족하는  $P_h$ 가 유일하게 존재함을 의미한다.

또한 그래프로부터 알 수 있는 중요한 사실로서,  $P_h \geq P_{a1} \geq P_{a2}$ 인 경우  $\dot{s} \geq \sqrt{(P_{a1} - P_{a2})/D}$ 이 만족되고, 역으로  $P_{a1} \geq P_{a2}$ 인 경우  $\dot{s} \geq \sqrt{(P_{a1} - P_{a2})/D}$ 이면  $P_h \geq P_{a1} \geq P_{a2}$ 임을 알 수 있다. 그러므로  $P_h$ 를 아직 모르는 경우일지라도  $\dot{s}$ 을 알고 있으면 각각의 경우로 (33)식 및 (34)식과 같이 나눌 수 있다.

이제 주어진  $\dot{s}$ 에 대해 판단식 (33)과 (34)식을 활용하여 어느 경우인지를 판별한 후, 각각의 경우에 대해 (22)식과 (23)식을 이용하면  $x_2$ 와  $P_h$ 를 결정할 수 있다. 예를 들어 첫 번째 경우에는  $P_h \geq P_{a1} \geq P_{a2}$ 이므로 (22)식과 (23)식은 각각 (35)식과 (36)식의 형태를 갖게 된다.

$$[P_{a1} \geq P_{a2}] \quad (33)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{s} \geq \sqrt{(P_{a1} - P_{a2})/D} \Leftrightarrow P_h \geq P_{a1} \geq P_{a2} \\ \left( \begin{array}{l} \sqrt{(P_{a1} - P_{a2})/D} > \dot{s} \text{ and} \\ \dot{s} \geq -\sqrt{(P_{a1} - P_{a2})/(\hat{E}e^2)} \end{array} \right) \Leftrightarrow P_{a1} > P_h \geq P_{a2} \\ -\sqrt{(P_{a1} - P_{a2})/(\hat{E}e^2)} > \dot{s} \Leftrightarrow P_{a1} \geq P_{a2} > P_h \end{array} \right.$$

$$[P_{a2} > P_{a1}] \quad (34)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{s} \geq \sqrt{(P_{a2} - P_{a1})/C} \Leftrightarrow P_h \geq P_{a2} > P_{a1} \\ \left( \begin{array}{l} \sqrt{(P_{a2} - P_{a1})/C} > \dot{s} \text{ and} \\ \dot{s} \geq -d\sqrt{(P_{a2} - P_{a1})/\hat{F}} \end{array} \right) \Leftrightarrow P_{a2} > P_h \geq P_{a1} \\ -d\sqrt{(P_{a2} - P_{a1})/\hat{F}} > \dot{s} \Leftrightarrow P_{a2} > P_{a1} > P_h \end{array} \right.$$

$$P_h - P_{a1} = C(\dot{s} + \dot{x}_2 d)^2 \quad (35)$$

$$P_h - P_{a2} = D(-\dot{x}_2 d)^2 \quad (36)$$

위 두 식을 이용하여  $P_h$ 를 소거한 후,  $x_2$ 에 대한 2차 방정식을 풀면 두 개의 근을 얻을 수 있다. 그리고 두 개의 근 중에서 이 경우에 해당되는 실제 해는 (24)식과 (25)식에 기술한 부등식 관계  $(\dot{s} + x_2 d) \geq 0$ 와  $(-x_2) \geq 0$ 를 만족해야 하므로, 이 부등식 관계를 이용하면 주어진  $\dot{s}$ 에 해당되는  $x_2$ 를 결정할 수 있다.  $x_2$ 를 결정된 후에는

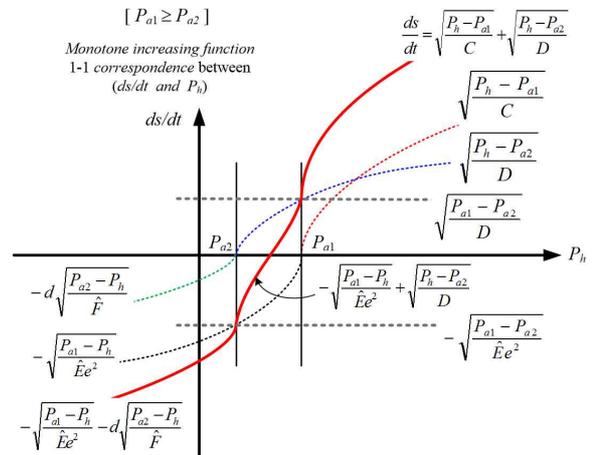


Fig. 2. Relationship between  $\dot{s}$  and  $P_h$  for the case of  $P_{a1} \geq P_{a2}$

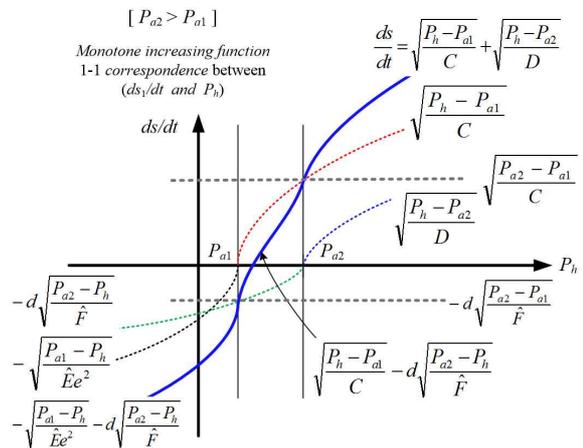


Fig. 3. Relationship between  $\dot{s}$  and  $P_h$  for the case of  $P_{a2} > P_{a1}$

**Table 4. Numerical algorithm for C-type double-acting shock absorber**

At the initial computation, set  $P_h^{Det} \equiv P_{a1}(0)$   
 For the given  $s$  and the known values  $[s, x_1, x_2, P_h^{Det}]$

Compute  $P_{a1}^* = P_{a1}(0) \left( \frac{V_{a1}(0)}{V_{a1}(x_1)} \right)^n$   
 $P_{a2}^* = P_{a2}(0) \left( \frac{V_{a2}(0)}{V_{a2}(x_2)} \right)^n$

If ( $P_{a2}^* \geq P_h^{Det}$  and  $x_2 \geq L_2$ )  
 Algorithm [S]

S1)  $Nstage = 1$

S2)  $\begin{cases} [s \geq 0] P_h^* = P_{a1}^* + C \cdot \dot{s} \\ [s < 0] P_h^* = P_{a1}^* - \hat{E}e^2(-\dot{s})^2 \end{cases}$

S3)  $\dot{x}_1^* = \left( -\frac{A_h}{A_{a1}} \right) \dot{s}$

S4)  $\dot{x}_2^* = 0$

Else  
 Algorithm [C]

$Nstage = 2$

If ( $P_{a1}^* \geq P_{a2}^*$ )

If ( $\dot{s} \geq \sqrt{\frac{P_{a1}^* - P_{a2}^*}{D}}$ )

If ( $C - D = 0$ )

$$\dot{x}_2 = -\frac{(C\dot{s}^2 + P_{a1}^* - P_{a2}^*)}{(2Cd)\dot{s}}$$

Else

$$\dot{x}_2 = \frac{[C\dot{s} - \sqrt{DC\dot{s}^2 + (D-C)(P_{a1}^* - P_{a2}^*)}]}{(D-C)d}$$

End

$$P_h^* = P_{a2}^* + Dd^2\dot{x}_2^2$$

Elseif ( $-\sqrt{\frac{P_{a1}^* - P_{a2}^*}{\hat{E}e^2}} \leq \dot{s} < \sqrt{\frac{P_{a1}^* - P_{a2}^*}{D}}$ )

$$\dot{x}_2 = \frac{[-\hat{E}e^2\dot{s} - \sqrt{-D\hat{E}e^2\dot{s}^2 + (D + \hat{E}e^2)(P_{a1}^* - P_{a2}^*)}]}{(D + \hat{E}e^2)d}$$

$$P_h^* = P_{a2}^* + Dd^2\dot{x}_2^2$$

Elseif ( $\dot{s} < -\sqrt{\frac{P_{a1}^* - P_{a2}^*}{\hat{E}e^2}}$ )

If ( $-\hat{F} + \hat{E}e^2d^2 = 0$ )

$$\dot{x}_2 = \frac{-\hat{E}e^2\dot{s}^2 + P_{a1}^* - P_{a2}^*}{2\hat{E}e^2d\dot{s}}$$

Else

$$\dot{x}_2 = \frac{[-\hat{E}e^2d\dot{s} - \sqrt{(\hat{F} + \hat{E}e^2d^2)(P_{a1}^* - P_{a2}^*)}]}{-\hat{F} + \hat{E}e^2d^2}$$

End

$$P_h^* = P_{a2}^* - \hat{F}x_2^2$$

End

Else

If ( $\dot{s} \geq \sqrt{\frac{P_{a2}^* - P_{a1}^*}{C}}$ )

If ( $C - D = 0$ )

$$\dot{x}_2 = \frac{(-C\dot{s}^2 + P_{a2}^* - P_{a1}^*)}{(2Cd)\dot{s}}$$

Else

$$\dot{x}_2 = \frac{[C\dot{s} - \sqrt{DC\dot{s}^2 + (D-C)(P_{a1}^* - P_{a2}^*)}]}{(D-C)d}$$

End

$$P_h^* = P_{a2}^* + Dd^2\dot{x}_2^2$$

Elseif ( $-d\sqrt{\frac{P_{a2}^* - P_{a1}^*}{\hat{F}}} \leq \dot{s} < \sqrt{\frac{P_{a2}^* - P_{a1}^*}{C}}$ )

$$\dot{x}_2 = \frac{[Cd\dot{s} - \sqrt{C^2d^2\dot{s}^2 + (-\hat{F} - Cd^2)(C\dot{s}^2 + P_{a1}^* - P_{a2}^*)}]}{-\hat{F} - Cd^2}$$

$$P_h^* = P_{a2}^* - \hat{F}x_2^2$$

Elseif ( $\dot{s} < -d\sqrt{\frac{P_{a2}^* - P_{a1}^*}{\hat{F}}}$ )

If ( $-\hat{F} + \hat{E}e^2d^2 = 0$ )

$$\dot{x}_2 = \frac{-\hat{E}e^2\dot{s}^2 + P_{a1}^* - P_{a2}^*}{2\hat{E}e^2d\dot{s}}$$

Else

$$\dot{x}_2 = \frac{[-\hat{E}e^2d\dot{s} - \sqrt{(\hat{F} + \hat{E}e^2d^2)(P_{a1}^* - P_{a2}^*)}]}{-\hat{F} + \hat{E}e^2d^2}$$

End

$$P_h^* = P_{a2}^* - \hat{F}x_2^2$$

End

$\dot{x}_1 = -(\dot{s}A_h + \dot{x}_2A_{a2})/A_{a1}$

End

If( $Nstage=1$  and  $P_{a2}^* < P_h^*$ )  
 Algorithm [C]  
 End

If( $Nstage=2$  and  $P_{a2}^* \geq P_h^*$  and  $x_2 \geq L_2$ )  
 Algorithm [S1], [S2]  
 If (Explicit time integration)  
 Algorithm [S3], [S4]  
 End

End

$P_h^{Det} = P_h^*$   
 $[x_1, x_2, P_h] = [x_1^*, x_2^*, P_h^*]$   
 Return the outputs  $[x_1, x_2, P_h, P_h^{Det}]$

(22)식 혹은 (23)식을 활용하여 최종적으로  $P_h$ 를 얻을 수 있다.

이상에서 설명한 방법에 의하여 모든 경우에 대해 주어진  $s$ 에 해당되는  $x_2$ 와  $P_h$ 를 결정할 수 있으며,  $x_1$ 은 (19)식과 앞서 구한  $x_2$ 을 이용하여 구할 수 있다. 본 논문에서는 지면 관계상 이상에서 설명된 사실을 종합하여 그 결과만 알고리즘으로 정리하여 Table 4에 나타내었다. 이때 단 변화는 B형과 동일하게 판단하였다.

### 2.1.5 내력의 계산

올레오식 2중 완충기 거동을 해석할 수 있도록, 앞서 기술한 완충기 종류별 알고리즘을 이용하여 MSC/ADAMS 상용 다물체 동역학 해석 소프트웨어의 사용자 서브루틴을 구현하였다. 사용자 서브루틴에서는 제안된 알고리즘을 통해 매 시간 증분단계의 반복계산 과정에서 챔버 압력  $P_h$ 와 높이 변화율  $x_1, x_2$ 를 구한 후 이를 통해 계산된 완충기 내력을 본 프로그램에 전달하게 된다. 이때 반복계산에 필요한 챔버 높이는 구해진 높이 변화율을 이용해 갱신하게 된다.

단일 완충기의 사용자 서브루틴은 기존 문헌 [2]과 비교하여 거동에 차이가 없음을 검증하였으며 기존 문헌이 없는 2중 완충기 거동의 경우에는 알고리즘 단계마다 matlab 프로그램과 결과를 비교하여 사용자 서브루틴을 검증하였다.

Figure 4에는 완충기 상부 실린더의 자유물체도를 도시하였다. 이로부터 벽면과의 마찰을 무시할 경우 완충기 내부에 발생하는 내력이 (37)식과 같이 표현될 수 있음을 알 수 있다. 여기서  $F_{stop}$ 은 실린더가 특정범위에서만 움직일 수 있도록 하는 구속력을 의미하며, 본 연구에서는 벌칙함수법[18, 19]을 통해 이를 구현하였다.

$$F_{int} = P_h A_h + F_{stop} \quad (37)$$

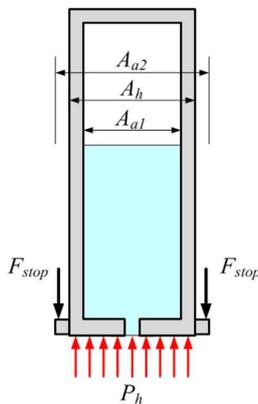


Fig. 4. Free body diagram for upper cylinder in oleo-pneumatic shock absorber

### 2.2 수치해석을 통한 모델 특성 비교

동일한 조건하에서 종류에 따른 2중 완충기 특성을 비교하기 위해 세 가지 2중 완충기 모두에 대해 동일한 제원과 동일한 초기부피 및 초기압력을 가지도록 설정하였다. 다만, A형과 B형 올레오식 2중 완충기와 달리 C형 올레오식 2중 완충기의 경우 하부 오리피스가 부가적으로 존재하기 때문에, C형 완충기의 하부 오리피스 면적을 상부 오리피스 면적의 1/2배( $A_{orf2\_half}$ 와  $\hat{A}_{orf2\_half}$ )와 2배( $A_{orf2\_double}$ 과  $\hat{A}_{orf2\_double}$ ) 크기로 설정하고 이 두 가지 경우에 대해 모두 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 완충기 제원과 초기부피 및 초기 압력은 Table 5에 제시하였다.

위에서 초기 유체 압력은 초기 저압가스 챔버의 압력과 동일하게 설정하여 외부 하중이 가해지지 않을 경우 오리피스를 통한 유동이 발생하지 않도록 해야 함에 유의해야 한다.

다음으로는 위의 제원으로 모델링된 올레오식 2중 완충기(A형 한 개 모델, B형 한 개 모델, C형 두 개 모델)에 대하여 아래 Fig. 5에 도시한

Table 5. Dimension, initial volume and initial pressure of shock absorber

|                        |             |                          |             |
|------------------------|-------------|--------------------------|-------------|
| $A_{a1}$               | $50cm^2$    | $P_{a1}(0)$              | $1.3MPa$    |
| $A_{a2}$               | $60cm^2$    | $P_{a2}(0)$              | $9.0MPa$    |
| $A_h$                  | $53cm^2$    | $P_h(0)$                 | $1.3MPa$    |
| $A_{orf1}$             | $10cm^2$    | $V_{a1}(0)$              | $1,400cm^3$ |
| $\hat{A}_{a1}$         | $0.4cm^2$   | $V_{a2}(0)$              | $1,320cm^3$ |
| $A_{orf2\_half}$       | $0.5cm^2$   | $A_{orf2\_double}$       | $2.0cm^2$   |
| $\hat{A}_{orf2\_half}$ | $0.2cm^2$   | $\hat{A}_{orf2\_double}$ | $0.8cm^2$   |
| $\rho$                 | $845kg/m^3$ | Lower mass               | $50kg$      |
| $C_d$                  | 0.72        | $n$                      | 1.4         |

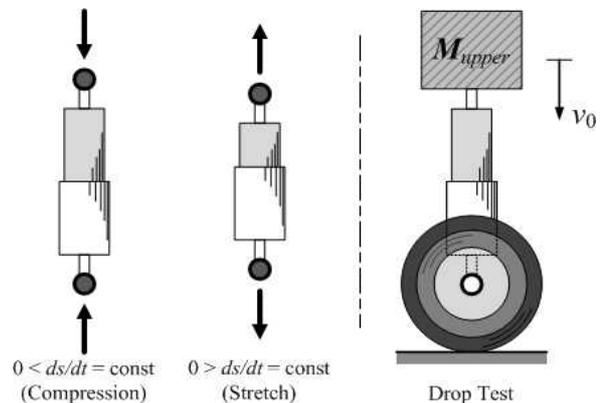


Fig. 5. Compression-stretch test under uniform stroke rate and drop test

바와 같이 균일한 스트로크 속도 하에서의 압축 / 팽창 수치모사 해석과 낙하 수치모사 해석을 수행하였다.

**2.2.1 균일 스트로크 속도 하에서의 압축/팽창 시험 수치모사 해석**

A형, B형, C형 올레오식 2중 완충기에 대하여 스트로크 속도를 균일하게 유지시키며 압축/팽창 해석을 수행하였다. 해석은 0.15m/s, 0.6m/s, 1.2m/s 세 가지 스트로크 속도로 수행하였으며, 세 경우 모두 스트로크가 30cm될 때까지 완충기를 압축시켰다가, 다시 반대 방향으로 동일한

크기의 스트로크 속도로 팽창시키면서 해석을 수행하였다. 이를 통해 얻은 스트로크-내력 곡선은 Fig. 6 좌측에, 완충기 내력의 시간이력은 Fig. 6 우측에 도시하였다. 이때 스트로크-내력 곡선에서는 위쪽 그래프가 압축거동을 아래쪽 그래프가 팽창거동을 나타내며, 시간이력 곡선에서는 초기 압축거동이 발생하다가 시간이 지나면 팽창거동이 발생한다. 그리고 스트로크-내력 곡선에서 압축거동(위쪽) 그래프와 팽창거동(아래쪽) 그래프에 의해 구성되는 히스테리시스(hysteresis) 폐곡선의 면적은 완충기로 인한 에너지 감쇠분에 해당된다.

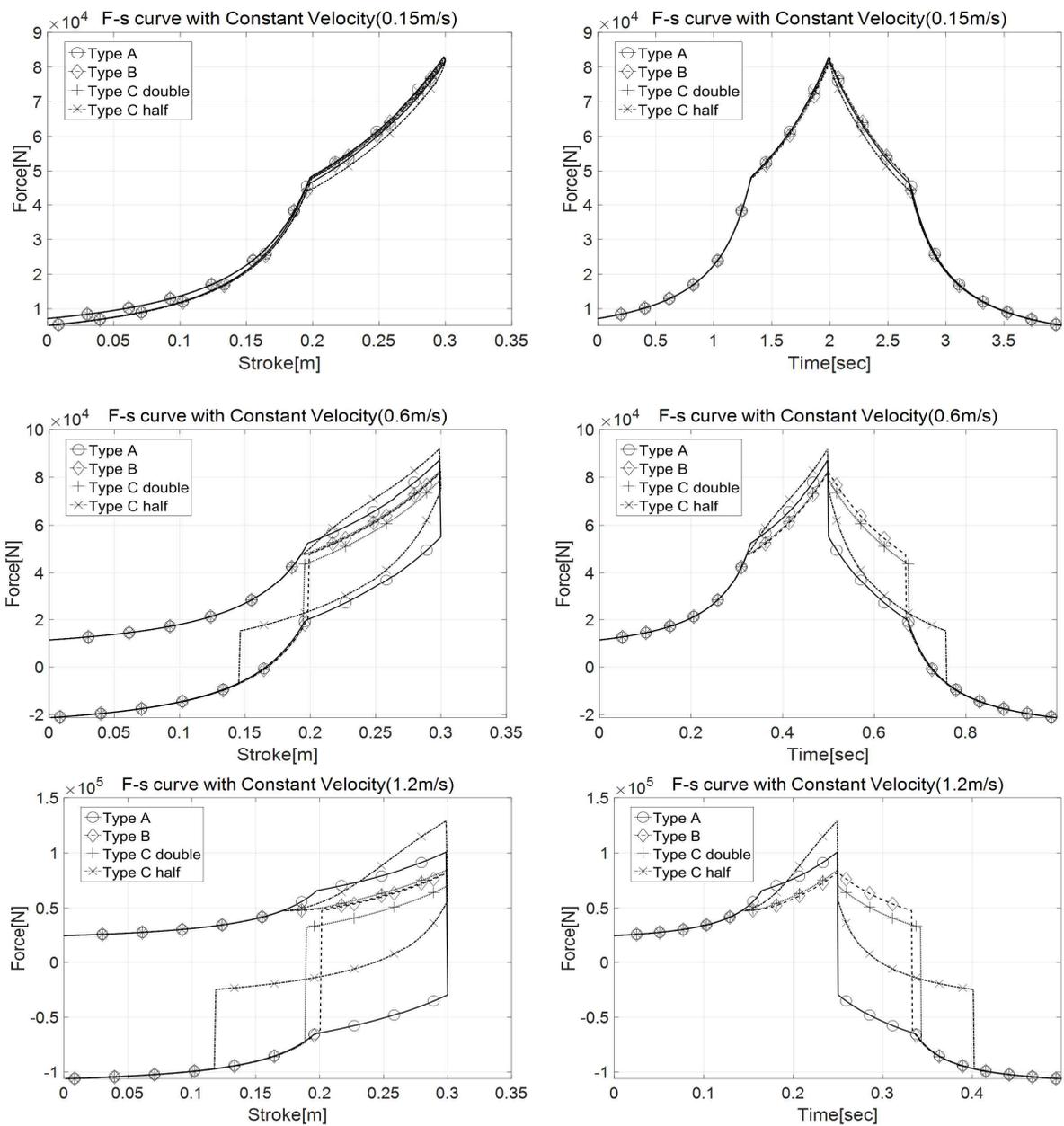


Fig. 6. Internal force for compression/stretch test under uniform stroke rate

스트로크 속도가  $0.15m/s$ 일 경우(Fig. 6 상단의 좌우측)에는, A형, B형, C형 2중 완충기가 매우 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있으며, 압축 시 스트로크-내력 그래프와 팽창 시 스트로크-내력 그래프가 거의 유사함을 관찰할 수 있다. 이는 상대적으로 스트로크 속도가 작기 때문에 준정적으로 완충기 거동이 발생하고 이로 인해 감쇠효과가 크지 않기 때문이며, 내력은 가스 챔버 압력에 의한 힘과 유사해진다. 또한 스트로크가  $20cm$  가량 되면 저압 가스 챔버의 압력이 고압가스 챔버의 압력과 동일해져 완충기 2단 거동이 시작되고, 이로 인해 스트로크-내력 곡선 기울기와 내력의 시간이력 곡선 기울기가 갑작스럽게 변하게 된다.

스트로크 속도가  $0.6m/s$ 일 경우의 결과를 Fig. 6 중앙의 좌우측에 도시하였다. 스트로크 속도가  $0.15m/s$ 인 경우와 달리 압축과 팽창 시 거동이 확연히 다름을 관찰할 수 있다. 또한 스트로크 속도가 커짐에 따라 에너지 감쇠에 해당하는 히스테리시스 폐곡선의 면적도 커지는 것을 확인할 수 있다. A형의 경우에는 압축거동에서 팽창거동으로 변할 때 내력이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있으나, B형의 경우에는 팽창거동이 시작될지라도 급격한 내력 변화가 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 그리고 B형의 경우 완충기 2단 거동이 진행되고 있을 때는 압축과 팽창거동이 상당히 유사함을 알 수 있고, 완충기 2단 거동에서 1단 거동으로 변하는 시점에 내력이 급격히 감소하는 것을 관찰할 수 있다. C형의 경우에는 압축거동에서 팽창거동으로 바뀌는 시점과 완충기 2단 거동이 끝나는 시점 모두에서 내력이 크게 변하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 하부 오리피스 면적을 조절한 C형 모델의 결과로부터 하부 오리피스 면적을 키울수록 B형의 거동과 유사해지며, 작아질수록 A형과 일부 유사한 특성이 나타남을 확인할 수 있다. 그리고 이러한 사실로부터 C형 2중 완충기의 하부 오리피스 면적을 조절하여 완충 특성을 변화시킬 수 있음을 알 수 있다.

스트로크 속도  $1.2m/s$ 에 대한 해석 결과로부터 앞서 언급한 A, B, C형 2중 완충기 거동 특성을 다시 확인할 수 있으며, 스트로크 속도 증가로 인해 에너지 감쇠량이 더욱 커짐을 확인할 수 있다.

### 2.2.2 낙하시험 수치모사 해석

다양한 조건에서 2중 완충기의 완충 특성을 고찰하기 위해 상부 질량과 초기 속도를 변화시키면서 Fig. 5의 우측에 도시한 바와 같은 낙하

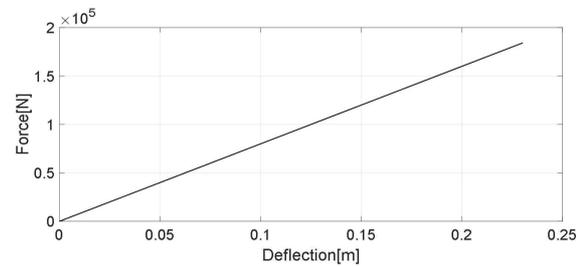


Fig. 7. Force-deflection curve for tire

시험 수치모사 해석을 수행하였다.

이때 타이어가 해석 결과에 미치는 영향을 최소화하기 위해 타이어는 선형으로 가정하였으며 이를 Fig. 7에 도시하였다.

낙하시험 수치모사 해석은 타이어가 지면에 닿는 순간부터, 완충 후 타이어가 지면에서 떨어지는 순간까지 수행하였으며, 착륙 시 항공기 무게와 양력이 동일하다는 가정 하에 중력과 양력은 고려하지 않았다.

#### 2.2.2.1 상부 질량의 변화에 따른 거동

상부 질량의 차이에 따라 각 완충의 특성이 어떻게 변하는지 고찰하기 위해 하강 속도를  $3m/s$ 로 고정하고 상부 질량을 변화시켜가며 낙하시험 수치모사 해석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 6과 Fig. 8에 도시하였다. 이때 완충 효율은 흡수된 에너지를 최대 하중과 최대 스트로크의 곱으로 나누어준 비율로 정의하였다[1].

해석 결과 B형과 C형의 경우 모든 해석에 대해 2단 거동이 발생하였으나 A형의 경우 상부 질량이  $2,500kg$ 일 때 까지 단일완충기만으로 작용하였음을 확인할 수 있으며, 이로부터 A형이 단일 완충기와 가장 유사한 특성이 있음을 유추할 수 있다.

최대하중의 경우 모든 상부질량에 대해 단일 완충기에서 가장 크게 발생하였으며, 2중 완충기 중에서는 상부질량이  $3,000kg$ 일 경우에는 A형 완충기가,  $3,500kg$ 일 경우에는 B형 완충기가 상대적으로 큰 최대하중을 가짐을 알 수 있다.

최대 스트로크는 상부질량이  $2,500kg$ 이상일 경우 B형에서 가장 크게 발생하였고, 상부질량이  $2,000kg$ 이하일 경우에는 C형 Double모델에서 가장 크게 발생하였다. 하지만 상부 질량  $2,000kg$  이하일 경우에도 B형과 C형 Double모델의 최대 스트로크 차이가 무시할 만한 크기라는 점을 고려할 때 B형 2중 완충기가 상대적으로 큰 스트로크를 갖는다고 할 수 있다.

그리고 Table 6의 결과로부터 최대 스트로크

Table 6. Results for various upper masses

| Upper Mass (kg) | Type     | Max Stroke (mm) | Max Force (kN) | Efficiency (%) |
|-----------------|----------|-----------------|----------------|----------------|
| 1,500           | Single   | 158.90          | 50.657         | 78.62          |
|                 | A        | 158.90          | 50.657         | 78.62          |
|                 | B        | 159.97          | 49.301         | 80.05          |
|                 | C double | 160.01          | 49.154         | 80.27          |
|                 | C half   | 159.79          | 49.760         | 79.44          |
| 2,000           | Single   | 182.52          | 55.050         | 79.26          |
|                 | A        | 182.52          | 55.050         | 79.26          |
|                 | B        | 185.70          | 51.576         | 82.00          |
|                 | C double | 185.85          | 51.120         | 82.59          |
|                 | C half   | 184.78          | 52.472         | 81.03          |
| 2,500           | Single   | 197.87          | 58.669         | 79.97          |
|                 | A        | 197.87          | 58.669         | 79.97          |
|                 | B        | 210.78          | 52.984         | 79.35          |
|                 | C double | 207.37          | 52.342         | 81.48          |
|                 | C half   | 206.13          | 54.417         | 79.52          |
| 3,000           | Single   | 209.08          | 61.876         | 79.60          |
|                 | A        | 221.66          | 61.810         | 78.37          |
|                 | B        | 239.71          | 58.229         | 66.90          |
|                 | C double | 235.49          | 56.994         | 70.18          |
|                 | C half   | 231.38          | 56.804         | 76.14          |
| 3,500           | Single   | 216.26          | 75.252         | 68.04          |
|                 | A        | 241.75          | 64.663         | 78.44          |
|                 | B        | 262.95          | 65.939         | 55.74          |
|                 | C double | 259.00          | 64.506         | 59.44          |
|                 | C half   | 253.51          | 64.710         | 69.20          |

\*밑줄은 각 무게별 최대 수치를 나타냄

가 가장 크더라도 가장 작은 최대하중을 가지는 것은 아님을 확인할 수 있다. 또한 단일완충기 및 A형 2중 완충기와 달리 B형과 C형 2중 완충기의 경우 내력이 불연속적으로 변하는 현상을 관찰할 수 있다. 이는 2단 거동에서 1단 거동으로 변화할 때 내부 격막이 갑자기 멈추게 되고, 이로 인해 갑작스럽게 압력이 변화되어 발생하는 현상이다.

이를 자세히 살펴보기 위해 Fig. 9에 내부 격막의 위치  $x_2$ 와 완충기 내력을 스트로크에 대한 그래프로 나타내었다. Fig. 9에 도시한 바와 같이 내부 격막이 움직일 수 있는 한계인 0.22m에 다다르는 순간 압력이 급격히 변화하고 내부 격막이 0.22m에 갑자기 멈추면서 2단에서 1단 거동으로 변하게 됨을 확인할 수 있다.

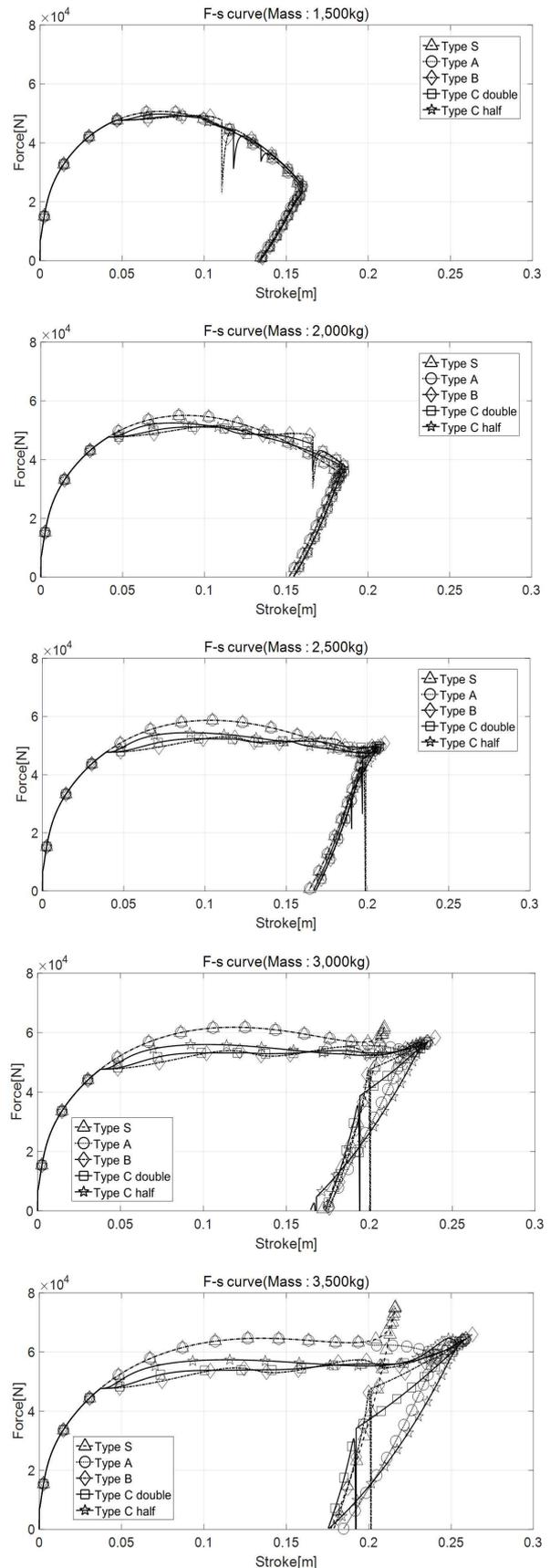


Fig. 8. Force–stroke curve w.r.t. upper mass

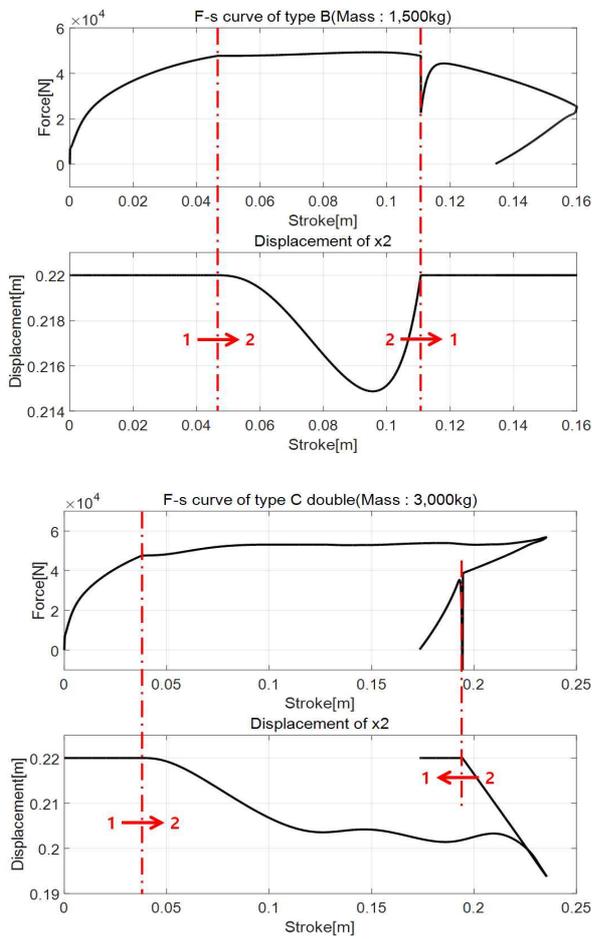


Fig. 9. Internal force and position of separation piston according to stroke

2.2.2.2 착륙 속도의 변화에 따른 거동

본 절에서는 낙하시험 시 착륙 속도의 변화에 따른 올레오식 2중 완충기 거동 특성을 비교하기 위해 상부 질량은 2,500kg으로 고정하고 착륙 속도를 변화시켜가며 낙하시험 수치모사 해석을 수행하였다. 이때 착륙 속도는 모든 유형의 완충기가 단일 완충기로 작동하는 2.5m/s에서부터 일부 완충기가 스트로크 한계에 도달하는 4.5m/s 까지 해석을 수행하였으며 해석 결과는 Table 7 과 Fig. 10에 나타내었다.

착륙속도가 2.5m/s일 때는 모든 유형의 완충기가 단일 완충기처럼 작용한 것을 확인할 수 있으며, A형의 경우에는 3m/s일 때도 단일완충기 로만 작용한 것을 확인할 수 있다. 착륙 속도가 4.5m/s일 때에는 B형과 C double형의 경우 스트로크가 한계에 도달하게 되면서 구속력  $F_{stop}$  이 발생하게 되고 이로 인해 비정상적으로 큰 하중

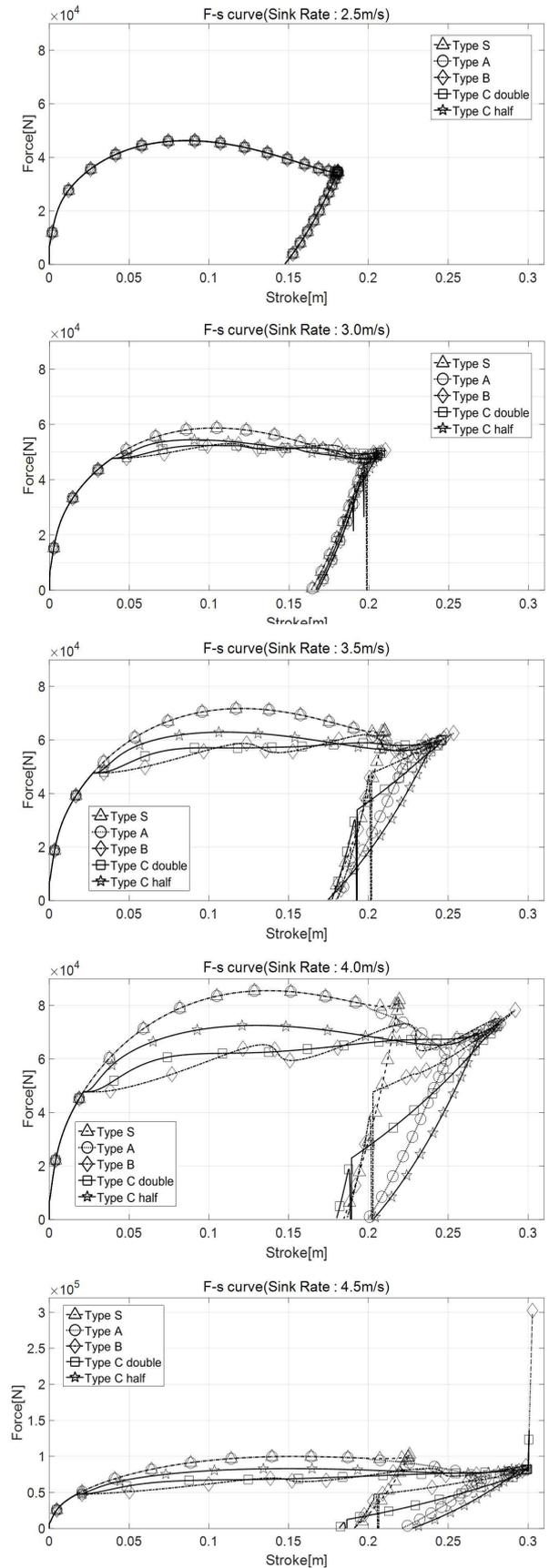


Fig. 10. Force-stroke curve w.r.t. sink rate

Table 7. Results for various sink rates

| Sink Rate (m/s) | Type     | Max Stroke (mm) | Max Force (kN) | Efficiency (%) |
|-----------------|----------|-----------------|----------------|----------------|
| 2.5             | Single   | <u>180.89</u>   | 46.265         | <u>79.80</u>   |
|                 | A        | 180.89          | 46.265         | 79.80          |
|                 | B        | 180.89          | 46.265         | 79.80          |
|                 | C double | 180.89          | 46.265         | 79.80          |
|                 | C half   | 180.89          | 46.265         | 79.80          |
| 3               | Single   | 197.87          | <u>58.669</u>  | 79.97          |
|                 | A        | 197.87          | 58.669         | 79.97          |
|                 | B        | <u>210.78</u>   | 52.984         | 79.35          |
|                 | C double | 207.37          | 52.342         | <u>81.48</u>   |
|                 | C half   | 206.13          | 54.417         | 79.52          |
| 3.5             | Single   | 210.14          | <u>71.812</u>  | <u>79.84</u>   |
|                 | A        | 224.85          | 71.812         | 78.41          |
|                 | B        | <u>253.41</u>   | 62.578         | 65.52          |
|                 | C double | 246.00          | 60.156         | 71.59          |
|                 | C half   | 239.54          | 62.983         | 78.08          |
| 4               | Single   | 219.28          | <u>85.584</u>  | <u>79.28</u>   |
|                 | A        | 248.95          | 85.583         | 78.58          |
|                 | B        | <u>292.12</u>   | 78.444         | 52.45          |
|                 | C double | 281.34          | 73.374         | 61.86          |
|                 | C half   | 268.73          | 72.600         | 79.14          |
| 4.5             | Single   | 225.83          | 102.79         | 76.35          |
|                 | A        | 271.05          | 99.919         | 78.62          |
|                 | B        | <u>303.31</u>   | <u>349.72</u>  | 13.11          |
|                 | C double | 300.67          | 136.63         | 37.50          |
|                 | C half   | 292.95          | 83.004         | <u>80.08</u>   |

\*밑줄은 각 속도별 최대 수치를 나타냄

이 발생하게 된다. 이때 300mm를 넘는 수치는 구속을 위배한 정도로서 구속력이 이에 비례하여 발생할 수 있도록 벌칙함수법[18,19]을 적용하였다. 또한 최대하중은 4.5m/s를 제외한 모든 속도에 대해 단일 완충기에서 가장 크게 발생하였으며, 2중 완충기 중에서는 A형 2중 완충기에서 가장 크게 발생하였다. 한편 최대 스트로크는 B형에서 가장 크게 발생하였다.

이상의 결과들로부터 최대하중의 경우 대체적으로 A형에서 가장 크게 나타나며, 최대 스트로크의 경우 대체적으로 B형에서 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 C형의 경우 하부 오리피

스를 변경하여 그 특성을 변화시킬 수 있음을 확인하였다.

2.2.2.3 낙하시험 수치모사 해석 결과 고찰

앞서의 결과로부터 2중 완충기는 단일완충기에 비해 상대적으로 더 큰 최대 스트로크와 더 낮은 최대 하중을 가짐을 알 수 있다. 이렇게 상대적으로 낮은 최대 하중을 갖는 2중 완충기의 특징은 승기감 및 지상운용 관점, 그리고 구조설계 측면에서 장점으로 작용할 수 있다. Fig. 11에는 동일 착륙 조건에 대한 단일 완충기와 A형 2중 완충기의 내부 압력 변화를 도시하였다. A형 2중 완충기의 경우 1단이 작용하는 동안에는 단일 완충기와 동일한 내부 압력을 갖게 된다. 하지만 저압가스 챔버의 압력( $P_{a1}$ )이 증가하여 고압가스 챔버의 압력( $P_{a2}$ )과 같아져서 2단 거동이 시작되면 동일 스트로크에 대한 가스챔버의 압력 증가율이 둔화되고, 이로 인해 Fig. 11과 같이 완충기의 최대 압력은 감소하고 스트로크는 증가하는 효과가 발생하게 된다.

앞서 전술한 바와 같이 모든 경우에 대해 성립하지는 않으나 대체적으로 최대하중의 경우 B형과 C형에 비해 A형이 더 큰 경향을 가지고 있으며, 최대 스트로크의 경우 A형에 비해 B형과 C형이 전반적으로 더 크게 발생하게 되며, 이는 2단 거동의 발생 메커니즘 차이에 의해 설명될 수 있다. 즉, B형과 C형의 경우에는 완충기가 압축될 때 유체압력  $P_h$ 가 고압가스 챔버 압력  $P_{a2}$ 보다 커지는 순간 즉각적으로 2단 거동이 시작된다.

하지만, A형의 경우에는 압축 시 유체 압력

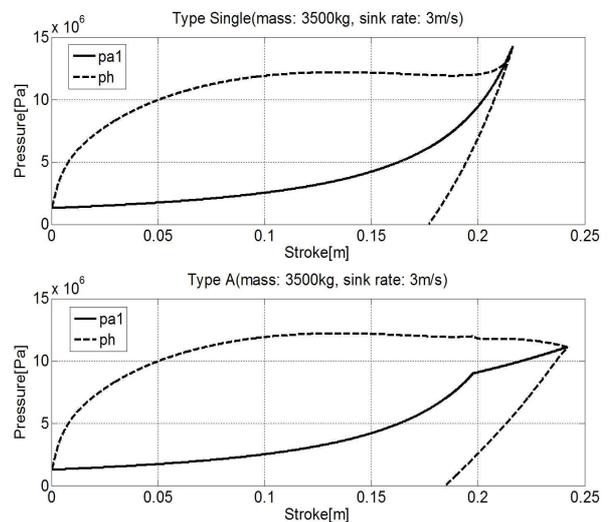


Fig. 11. Comparison of pressure-stroke curves (single vs. A-type)

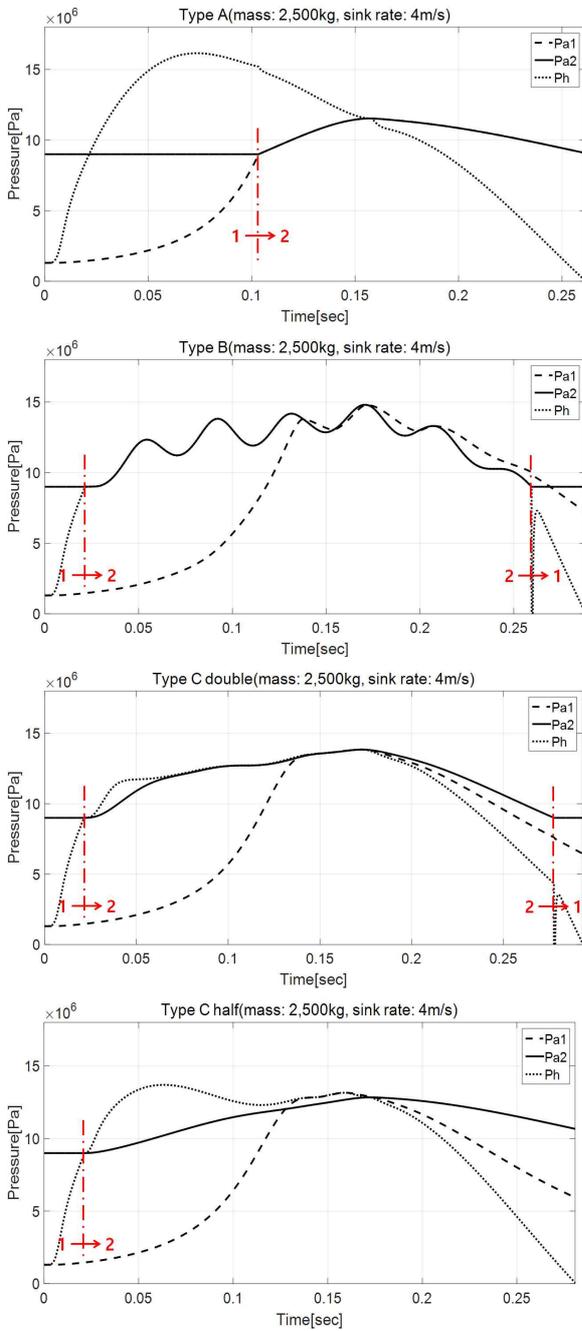


Fig. 12. Pressure history of each type

$P_h$ 가 증가함에 따라 점차적으로 저압가스 챔버 압력  $P_{a1}$ 이 증가하고, 그 값이 고압가스 챔버 압력  $P_{a2}$ 와 같아질 때 비로소 2단 거동이 시작된 다. 이러한 메커니즘 차이로 인해 A형의 경우 상대적으로 늦게 2중 완충기 효과가 발생하게 된다. 이를 자세히 고찰하기 위해 Fig. 12에 2중 완충기 유형별로 시간에 따른 내부 압력의 변화를 도시하고, 단 거동이 1단에서 2단으로, 혹은 2단에서 1단으로 변화되는 시점을 표시하였다.

앞서 언급한 바와 같이 C형 2중 완충기의 경

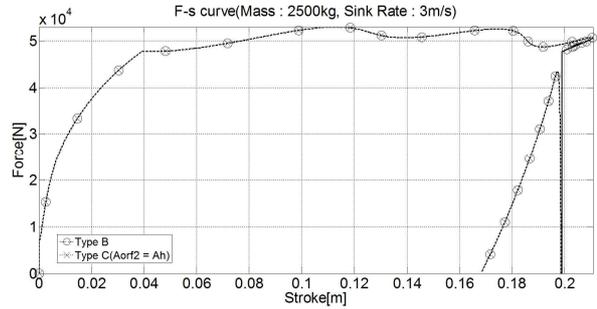


Fig. 13. Force-stroke curves (B-type vs. C-type with  $[A_{orf2}=A_h, \dot{A}_{orf2}=A_{a2}]$ )

우 하부 오리피스 면적을 변경하여 그 특성을 변화시킬 수 있으며, 오리피스의 크기를 증가시킬수록 B형 2중 완충기와 유사한 특성을 가지게 된다. 이에 Fig. 13에서는 C형 2중 완충기의 하부 오리피스 면적  $A_{orf2}$ 를  $A_h$ 로,  $\dot{A}_{orf2}$ 를  $A_{a2}$ 로 증가시킨 후 낙하시험 수치모사 해석을 수행하였으며, 이를 B형 2중 완충기로부터 얻은 결과와 비교하였다. 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 하부 오리피스 면적을 증가시키에 따라 C형 2중 완충기의 하부 오리피스 효과가 사라지고 이에 따라 B형 2중 완충기와 동일한 거동을 보이게 됨을 확인할 수 있다.

하지만 C형 2중 완충기의 하부 오리피스 면적이 작은 경우에는 Fig. 12에서 알 수 있는 바와 같이 유체압력  $P_h$ 가 증가하여 고압 가스챔버의 압력  $P_{a2}$ 에 도달하게 되더라도,  $P_h$ 와  $P_{a2}$ 가 같이 변화하는 B형과 달리 유체압력  $P_h$ 와 고압 가스 챔버의 압력  $P_{a2}$ 가 서로 다른 값을 가지고 변하게 된다.

이때  $P_h$ 가  $P_{a2}$ 보다 큰 경우에는 격막이 아래로 이동하게 되고,  $P_h$ 가  $P_{a2}$ 보다 작은 경우에는 격막이 위로 이동하게 된다. 이러한 이유로 말미암아 C형 2중 완충기의 경우 B형 2중 완충기에 비해 다소 최대 스트로크가 작아지게 경향을 가지게 된다. 이러한 C형 하부 오리피스 관련 특성을 적절히 활용하면 요구되는 착륙조건에 따라 완충성능을 조절할 수 있을 것으로 판단된다.

### III. 결 론

본 연구에서는 단일 완충기 및 세 가지 올레오식 2중 완충기 거동을 예측하고 그 특성을 비교 분석하기 위해 첫 단계 연구[11]에서 제안된 수학적 모델을 기반으로 수치해석 알고리즘을 구성하였다. 구성된 알고리즘은 MSC/ADAMS

사용자 서브루틴을 통해 구현하였으며, 이를 활용하여 압축/팽창 시험 및 낙하시험에 대한 각종 수치모사 해석을 수행하였다.

스트로크 변화율, 상부질량, 착륙 하강속도 등을 변화시켜가며 다양한 해석을 수행하였으며, 이를 통해 각 올레오식 단일 완충기 및 2중 완충기 특성을 비교 분석하였다.

올레오식 단일 완충기는 대부분의 경우 2중 완충기보다 효율이 높다는 장점을 갖고 있으나, 상대적으로 큰 착륙하중이 발생하게 된다.

이에 비해 2중 완충기는 메커니즘의 특성으로 인해 최대 하중이 작아지는 반면 최대 스트로크가 커지는 특성을 가지는데 이때 단일 완충기에 비해 효율이 증가하기보다는 감소하는 경향을 보인다. 그러나 실제 항공기 구조물에는 과도한 하중이 가해질 경우 손상이 발생할 수 있으므로 필요할 경우 2중 완충기를 적절히 활용함으로써 비록 최대 스트로크가 증가하는 단점을 감안하더라도 구조적으로는 안전하게 착륙을 할 수 있음을 확인할 수 있다.

A형 2중 완충기의 경우 다른 유형의 2중 완충기에 비해 최대하중이 크고 최대 스트로크가 작은 것을 확인하였다. 이는 내부 압력변화 메커니즘 분석을 통해 원인을 규명하였으며 이로 인해 A형 2중 완충기는 비교적 단일 완충기에 가까운 특성을 가지는 것을 확인하였다. 그리고 효율이 높은 단일 완충기의 특성에 가까운 만큼 대체적으로 효율이 높은 것을 확인하였다.

한편 B형 2중 완충기의 경우 단일 완충기 대비 2중 완충기가 가지는 작은 최대하중, 큰 최대스트로크라는 특징이 가장 잘 나타나고 있다. 그러나 B형 2중 완충기의 경우 대체적으로 효율이 가장 낮은 것을 확인하였다.

마지막으로 C형 2중 완충기의 경우 하부 오리피스 면적에 따라 그 특성이 변하게 되는데 본 연구에서 수행한 모든 착륙조건에 대해서 B형 2중 완충기에 비해 C double형 또는 C half형 2중 완충기의 최대 하중과 최대 스트로크가 작고 효율이 높은 것을 확인하였다. 즉, C형 2중 완충기는 A형 2중 완충기보다 2중 완충기의 특성을 잘 살릴 수 있음과 동시에 요구되는 착륙조건에 따라 하부 오리피스 면적을 적절히 설계함으로써 B형 2중 완충기보다 최대하중과 최대 스트로크가 작고 효율이 높은 완충기의 설계가 가능하다는 것을 의미한다.

본 연구를 통해 확인된 단일 완충기 및 2중 완충기 유형별 특성을 바탕으로 항공기 착륙장치 개발 시 요구되는 착륙조건이나 기체 구조물

의 하중 허용범위 등을 고려하여 적절한 완충기를 선정하고 설계하는데 있어서 기초 자료로서 적극 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 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) Kim, D. H., Lim, K. H., Hwang, J. H., Jeon, J. C., Ko, H. Y., and Lee, H. K., "Dynamic Characteristics and Optimal Design of an Aircraft Landing Gear," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 21, No. 4, 1993, pp. 37~48.
- 4) Daniels, J. N., *A Method for Landing Gear Modeling and Simulation with Experimental Validation*, National Aeronautics and Space Administration Contractor Report 201601, June 1996.
- 5) Lim, J. S., Kim, Y. Y., Kim, S. H., Kim, Y. I., and Lee, G. Y., "Modeling and Validation for Load Analysis of T-50 Aircraft Nose Landing Gear," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2003, pp. 866~869.
- 6) 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.
- 7) 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.

8) 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.

9) Jeong, S. H., Cho, J. Y., Kim, J. H., Byun, K. H., and Lee, S. G., "Landing Simulation of Aircraft using RecurDyn," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2013, pp. 1167~1171.

10) 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.

11) 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 I. Mathematical Modeling," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 45, No. 11, 2017, pp. 939~950.

12) Melik-Zade, N. A., "The Operation of a Two-Chamber Pseudraulic 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.)

13) 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.

14) 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.

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

16) 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.

17) 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.

18) Cho, J. Y., and Kim, S. J., "Discontinuous Time-Integration Method for Dynamic Contact/Impact Problems," *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 7, July 1999, pp. 874-880.

19) Bazaraa, M. S., Sherali, H. D., and Shetty, C. M., *Nonlinear Programming - Theory and Algorithms*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993.