

Micro Shock Tube 유동에 관한 실험적 연구

박진욱* · 김규완* · 김희동*†

An Experimental Study on Micro Shock Tube Flow

Jinouk Park* · Gyuwan Kim* · Heuydong Kim*†

ABSTRACT

Past few years have seen the growing importance of micro shock tubes in various engineering applications. A pharma ballistic technique is one such application which uses micro shock tube to accelerate drug particles and penetrate into skin, thus avoiding the usual injection drug delivery system. But for the efficient design of such instruments requires the detailed knowledge of shock characteristics and flow field inside a micro shock tube. Due to many factors such as boundary layer, low Reynolds number and high Knudsen number shock propagation inside micro shock tubes will be quite different from that of the well established macro shock tubes. In the present study, experimental studies were carried out on a micro shock tube of 3 mm diameter to investigate flow characteristics and shock propagation. Pressure values were measured at different locations inside the driven section. From the experimental values other parameters like shock velocity, shock strength were found and shock wave diagram was constructed.

초 록

최근 다양한 공학 응용 분야에 Micro Shock Tube의 중요성이 커지고 있다. Pharma Ballistic 기술은 기존의 약물주입방법과 달리 약물입자를 가속하여 피부로 침투시키기 위해 Micro Shock Tube를 적용하는 기술 중 하나이다. 그러나 이러한 장치의 효율적인 설계를 위해서는 Micro Shock Tube 내부유동과 충격특성에 대한 상세한 지식을 필요로 한다. 경계층과 같은 많은 요소들 때문에 Micro Shock Tube 내부의 낮은 Reynolds Number와 높은 Knudsen Number가 형성되며, 이 때의 충격파 전파는 기존의 Macro Shock Tube와 상이하게 나타난다. 본 연구에서는 Micro Shock Tube에서의 충격파 전파와 유동특성을 조사하기 위해 직경 3mm의 Micro Shock Tube를 이용하여 실험을 수행하였으며, 압력은 저압관의 세 지점에서 측정되었다. 충격파 속도와 같은 다른 변수들의 실험값으로부터 충격파 강도를 찾고 충격파 선도를 나타내었다.

Key Words: Shock Wave(충격파), Micro Shock Tube(미소충격파관), Diaphragm(격막), Shock Wave propagation(충격파 전파), Rupture Pressure(파막압력)

* 안동대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

1. 서 론

최근 가속의 규제역 파동 및 각종 조류 독감 등의 생태계 전염병이나 질병의 문제는 지구 환경변화와 더불어 장래에 더욱 심각해 질 것으로 예상되며, 국가 경제는 물론 우리의 실생활에 치명적 타격을 주게 될 것이다. 그런 이유로 효과적인 백신 접종법이나 치료법에 대한 연구가 절실한 상태이며 그 해결책 중 하나로 Pharma Ballistic Range의 개발이 미국 및 영국에서 활발하게 이루어지고 있다.[1] Pharma Ballistic 기술은 약물입자를 가속하여 피부로 침투시키기 위해 Micro Shock Tube를 적용하는 기술 중 하나이다.[2]

Micro Shock Tube는 최근 다양한 공학 응용 분야에서 중요성이 커지고 있는 것을 볼 수 있다.[3] 본 연구에서는 Micro Shock Tube를 Pharma Ballistic Range에 적용하기 위한 기초적인 연구의 일환으로 수행되었으며 이러한 장치의 효율적인 설계를 위해서는 Micro Shock Tube의 내부유동과 충격특성에 대한 상세한 지식이 필요하다. Micro Shock Tube에서는 초기압력비나 파막과정 등이 충격과 관내부에서 발생하는 비정상 유동장(충격파나 접촉면 전파 특성 등)에 큰 영향을 미치게 되지만, 종래에 행해진 많은 Macro Shock Tube의 연구결과들과는 달리 Micro Shock Tube에 관련된 실험결과는 아직 충분하지 않고, 잘 알려져 있지 않은 상태이다. 그리고 Micro Shock Tube에서의 내부유동은

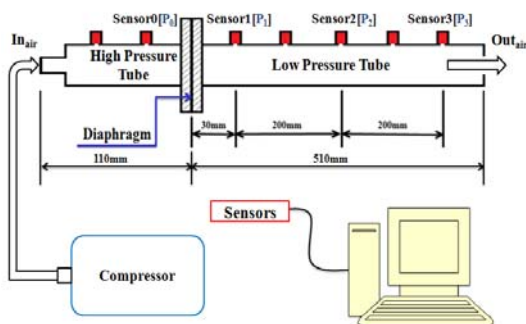
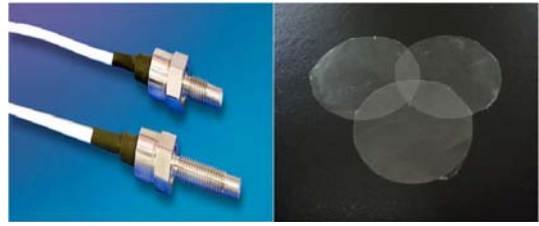


Fig. 1 Schematic of the micro shock tube



(a) Pressure Sensor (b) Diaphragm
Fig. 2 Pressure sensor (XT-190 series [Kulite]) and Diaphragm

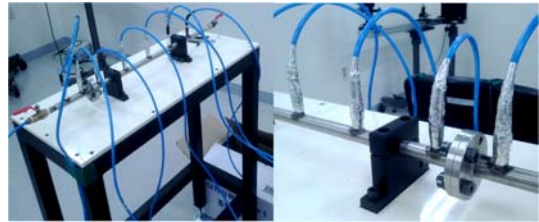


Fig. 3 Micro shock tube in ANU

매우 작은 직경으로 인해 높은 Knudsen Number, 낮은 Reynolds Number 그리고 부피에 대한 표면적의 비율이 높게 형성될 것이며, 이러한 특성으로 기존의 Macro Shock Tube 유동과는 상이하게 나타난다.[4,5]

본 연구는 Micro Shock Tube의 유동특성을 파악하기 위해 먼저 Micro Shock Tube를 설계 및 제작하였으며, 다양한 격막제 사용으로 격막의 강도를 조절하여 파막압력을 조절하였고, 실험으로 얻어진 충격파강도를 이용하여 충격파관 이론결과를 도출해보고 어떠한 차이를 가지는지 비교하고 분석해 보았다.

2. 실험방법

Figure 1에는 본 연구에서 사용된 Micro Shock Tube의 개략을 나타내었다. Micro Shock Tube는 고압관과 저압관, 그리고 고압관과 저압관 사이에 위치한 격막으로 구성 되어 있으며 총 길이 620 mm (고압관 : 110 mm, 저압관 : 510 mm), 직경 3 mm, 재질은 스테인리스로 제

작하였다. 고압관은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 압축기와 연결되어 있으며 압축기에서 압축된 공기는 고압관으로 주입되어 고압관의 압력을 상승시켜 장착된 격막을 자연 파막시킨다. 이 때 형성된 충격파는 저압관을 지나 대기로 방출 된다. 이때, 각 지점에서의 압력거동 및 충격파 속도를 측정하기 위해 스트레인게이지 형식의 압력 센서 XT-190 series를 총 네 지점에 설치하여 신호를 검출하였다. 고압관에는 격막이 파막되는 압력을 측정하기 위해 격막에 인접한 위치에 Sensor0(P₀)를 설치하였으며, 저압관에는 충격파가 전파되는 것을 정성적으로 파악하기 위해 격막 위치에서부터 30 mm 떨어진 곳에 Sensor1(P₁)을 설치하고 Sensor2(P₂), Sensor3(P₃)의 간격을 200 mm로 일정하게 설치하였다. 그리고 LabVIEW(NI)를 사용하여 데이터를 받아들이 분석하였다. 본 연구에서 쓰인 격막재는 파막 압력(P₀)을 조절하기 위해 강도가 다른 세가지를 사용하였으며, 격막재의 재질을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. List of different diaphragm materials

격막	재질
L	LLD-PE(Linear low-density polyethylene)
P	PP(Poly Propylene)
O	OPP(Oriented Polypropylene)

3. Shock tube 유동의 이론해석

본 연구에서 수행된 Micro Shock Tube 실험에서 얻어진 충격파 전파 특성과 일반 충격파관 이론결과를 비교 분석하기 위해 이론해석을 수행하였다. 아래 식에서 사용된 구간은 Fig. 4에 도시한 바와 같다.

먼저, 고압관과 저압관의 초기압력비(P₄/P₁)는 Eq. 1과 같이 비열비(γ)와 충격파 마하수(M_s)로 구할 수 있다.

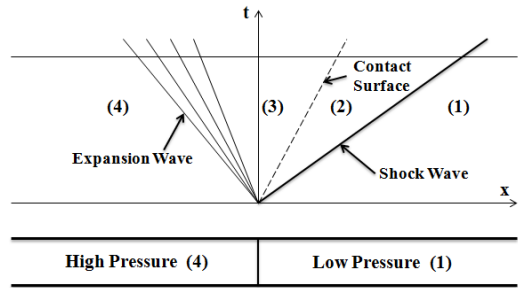


Fig. 4 Motion in a shock tube

$$\frac{P_4}{P_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1}(M_s^2 - 1) \quad (1)$$

여기서, P₄/P₁은 실험시 얻어진 저압관의 초기 압력(P_a=대기압)에 따른 파막압력(P₀)의 비 이므로 충격파 마하수(M_s)를 Eq. 2를 이용하여 구할 수 있다. 이 때 공기의 비열비(γ)는 1.4, 저압관의 음속(a₁)은 표준상태라 가정하고 Eq. 3을 이용하여 구하였다.

$$M_s = \frac{U_s}{a_1} = \sqrt{\frac{\gamma+1}{2\gamma} \left(\frac{P_4}{P_1} - 1 \right) + 1} \quad (2)$$

$$a_1 = \sqrt{\gamma R T_1} \quad (3)$$

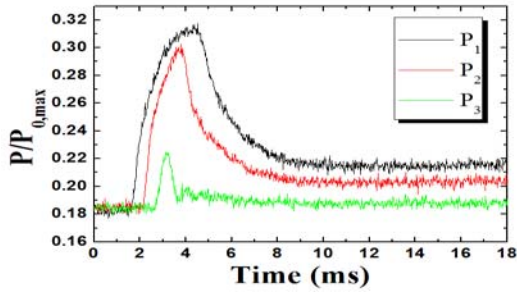
Equation 2의 식을 충격파 속도(U_s)에 관한 식으로 나타내면 Eq. 4와 같이되며 Eq. 2에서 구해진 충격파 마하수(M_s)와 음속(a₁), 실험으로 얻어진 초기압력비를 대입하여 충격파 속도(U_s)를 구할 수 있다.

$$U_s = a_1 \sqrt{\frac{\gamma+1}{2\gamma} \left(\frac{P_4}{P_1} - 1 \right) + 1} \quad (4)$$

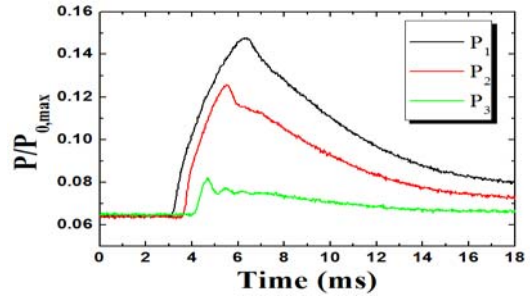
본 연구에서 수행된 실험의 각 Case들의 초기 압력비를 이용하여 같은 조건에서의 일반 충격파관의 이론해석을 하였으며 그 결과값을 Table 3에 실험값과 비교하여 정리하였다.

4. 실험결과 및 고찰

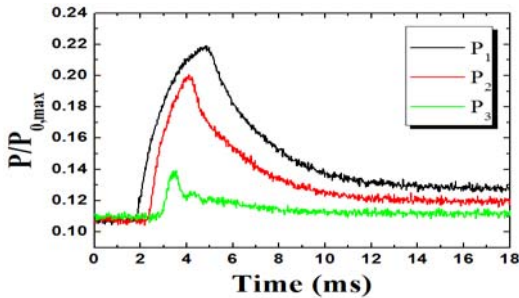
Figure 5는 각 Case의 P₀에 따른 P₁, P₂, P₃의 압력 변화를 무차원화하여 나타낸 그래프이다. 이때, P₀는 격막이 파막 되는 압력이며 P₁, P₂,



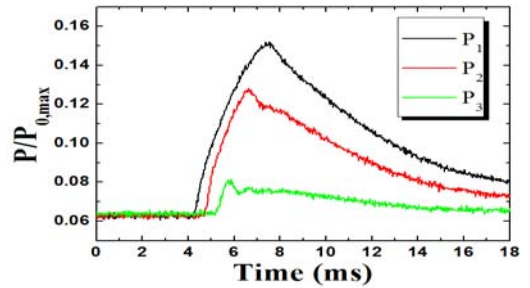
(a) $P_{0,max} = 5.46$ bar



(e) $P_{0,max} = 15.78$ bar

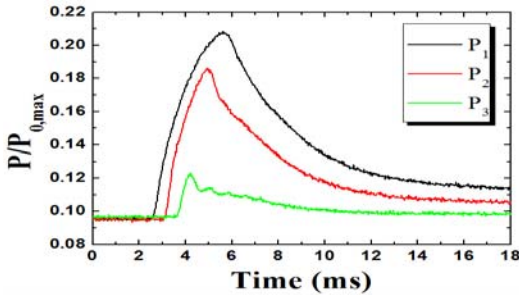


(b) $P_{0,max} = 9.29$ bar

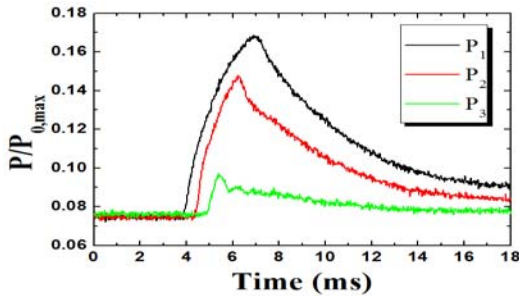


(f) $P_{0,max} = 15.9$ bar

Fig. 5 Pressure-time diagram



(c) $P_{0,max} = 10.58$ bar



(d) $P_{0,max} = 13.39$ bar

P_3 는 저압관 각 지점에서의 압력이다. 격막이 파막 되어 고압실로부터 고압의 공기가 배출되어 저압관을 통해 대기로 배출되는데 그 때 발생된 충격파 전파를 P_1 , P_2 , P_3 세 지점의 압력변화를 통해서 확인할 수 있다.

Table 2를 보면 파막압력(P_0)이 증가함에 따라 저압관의 각 지점 P_{max} 값들이 증가함을 알 수 있다. 그 결과는 Fig. 6에서 보기 쉽게 나타내었으며 그래프에서 볼 수 있듯이 충격파가 발생하는 지점으로부터 멀어질수록 압력상승 폭이 줄어드는 것을 볼 수 있으며 저압관의 끝 지점에 위치한 $P_{3,max}$ 에서는 변화가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5의 (a)~(f)를 보면 파막압력(P_0)이 증가할수록 P/P_0 값은 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과로 파막압력(P_0)이 큰 폭으로 증가하여도 저압관에서의 압력은 큰 폭으로 변화하지 않는다는 것을 알 수 있으며 Micro Shock Tube 관내유동에서는 파막압력이 높아질수록 압력강하도 증가한다는 것을 알 수 있다.

Table 2. Data sheet for different rupture conditions

Case	격막	격막수	$P_{0,max}$	$P_{1,max}$	$P_{2,max}$	$P_{3,max}$
(a)	L	1	5.46	1.73	1.65	1.23
(b)	L	2	9.29	2.04	1.86	1.26
(c)	O	1	10.58	2.21	1.97	1.29
(d)	L	3	13.39	2.26	1.98	1.3
(e)	P	2	15.78	2.33	1.99	1.31
(f)	O + L	2(1+1)	15.9	2.42	2.04	1.32

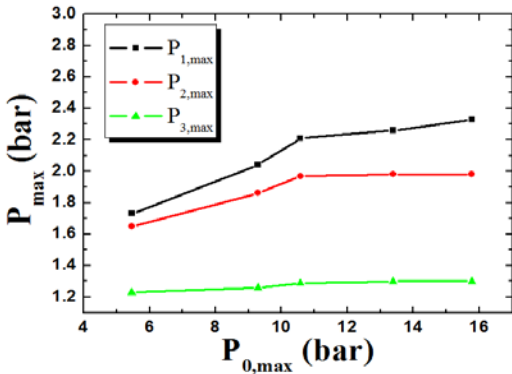


Fig. 6 Relationship between P_0 and P_{max}

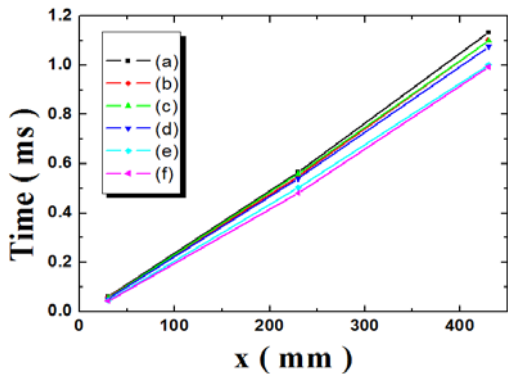


Fig. 7 x-t Diagram

Figure 7는 각 Sensor에서 검출한 신호를 이용하여 x-t 그래프를 나타낸 것으로, 미세하지만 거리의 증가에 따라 그래프의 기울기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 앞의 결과

와 같이 Micro Shock Tube 관내에서의 압력강하로 인해 충격파 속도(U_s) 또한 감소한다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 8에서 나타낸 파막압력(P_0)에 따른 각 구간의 충격파 속도(U_s) 그래프에서도 확인할 수 있다. 이 그래프에서는 Sensor1에서 Sensor2 사이의 구간 속도를 U_{1-2} , Sensor2에서 Sensor3 구간의 속도를 U_{2-3} 로 지정하여 나타내었다.

Figure 8에서와 같이 U_{1-2} 와 U_{2-3} 의 속도 차이는 평균적으로 30 m/s 정도가 생기며, Case(a)에서 Case(f)까지 파막압력(P_0)이 약 10 bar 정도 증가함에 따라 U_{1-2} 와 U_{2-3} 두 구간에서의 충격파 속도(U_s)는 각각 50 m/s와 45 m/s 정도 증가함을 알 수 있다. 이 그래프에서 속도의 증가가 선형적으로 나타나지 않는 것은 각 Case에서 다른 격막재를 사용하여 실험을 수행하였기 때문에 격막재의 성질에 따른 파막과정의 차이로 인해 생긴 결과라 판단된다. 그리고 여기서, 얻어진 각 Case들의 실험값을 이용하여 동일한 조건에서의 일반 충격파관에서의 유동은 어떻게 형성되는지 앞에서 수행되었던 이론해석 결과와 비교 분석하였다.

Figure 9의 그래프를 보면 실험값과 이론값의 충격파 속도(U_s)가 큰 차이를 가진다는 것을 알 수 있으며, 그 차이는 파막압력(P_0)이 커질수록 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과 또한 앞에서의 결과와 같이 관내에서의 압력강하에 의해서 발생되며 이러한 큰 압력강하 현상은

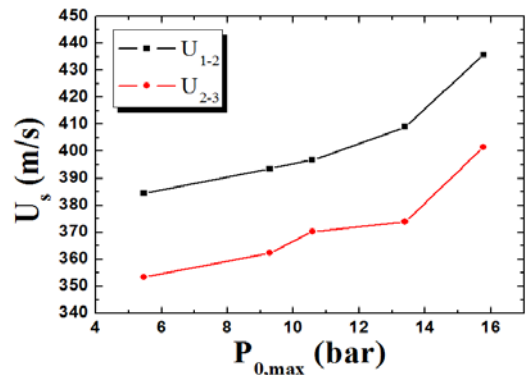


Fig. 8 Relationship between P_0 and U_s

Table 3. U_{th} and U_{exp} versus rupture pressure

Case	파막압력($P_{0,max}$)	U_{th}	$U_{1-2,exp}$	$U_{2-3,exp}$
(a)	5.46 bar	986	384	353
(b)	9.29 bar	1308	393	362
(c)	10.58 bar	1399	396	370
(d)	13.39 bar	1582	408	373
(e)	15.78 bar	1721	435	401

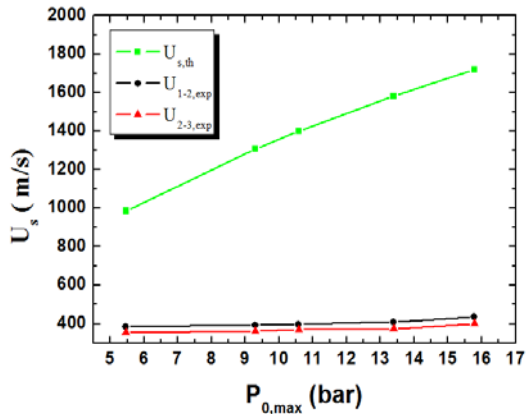


Fig. 9 Relationship between $P_{0,max}$ and U_s

Micro Shock Tube의 매우 작은 직경으로 인해 점성, 즉 내부마찰에 영향을 받은 것이라 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 Micro Shock Tube의 내부 유동을 실험적으로 조사하기 위하여, 세 가지 종류의 격막을 사용하여 총 6개의 파막압력조건을 조성하여 실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 파막압력(P_0)은 Micro Shock Tube의 내부 유동에 지배적인 영향을 미치게 되며, 이는 저압관 내부에 형성되는 충격파 전파에 큰 영향을 미친다.
- (2) Micro Shock Tube에서는 같은 조건의 Macro Shock Tube에서의 충격파 전파보다

느린 충격파가 발생되었으며, 비교적 짧은 길이에서도 큰 감속이 일어났다.

- (3) 향 후 Micro Shock Tube의 직경을 달리하고 최적의 파막 특성을 가지는 격막재를 선정하기 위한 실험을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 한국연구재단(NRF)의 사업인 중견연구자 지원사업 (과제번호: 2011-0017506)의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Burkoth, T.L., Bellhouse, B.J., Hewson, G., Longridge, D.J. Muddle, A.G. & Sarphe, D.F. "Transdermal and Transmucosal Powdered Drug Delivery," *Critical Reviews in Therapeutic Drug Carrier Systems* 164, 1999, pp.331-384
2. Rajesh, G., Kim, H. D., Setoguchi, T. & Matsuo, S., "Performance Analysis of Ballistic Range," *Journal of Aerospace Science, Part G, IMechE* 221, 2007, pp.649-659
3. 김희동, "유체공학에서 충격파현상(II)," *대한기계학회지*, 제35권, 제1호, 1995, pp.71-83
4. Arun, K. R., Kim, H. D. and Setoguchi, T., "Numerical Prediction of the Flow Characteristics of a Micro Shock Tube," *Proceedings of AJCPP2012, Xi'an, China, AJCPP2012-167*, 2012
5. Arun, K. R., Kim, H. D., "Numerical Visualization of the Unsteady Shock Wave Flow Field in Micro Shock Tube," *Journal of KSV*, 10th, Vol.1, 2012, pp.40~46