Micro Shock Tube에서 발생하는 충격파 실험

박진욱^a · 김규완^a · 김희동^{a,*}Experimental Study of the Shock Wave Dynamics
in Micro Shock TubeJinouk Park^a · Gyuwan Kim^a · Heuydong Kim^{a,*}^aDepartment of Mechanical Engineering, Andong National University, Korea^{*}Corresponding author. E-mail: kimhd@andong.ac.kr

ABSTRACT

Micro shock tubes are now-a-days used for a variety engineering applications such as in the field of aerospace, combustion technology and drug delivery systems. But the flow characteristics of micro shock tube will be different from that of well established conventional macro shock tube under the influence of very low Reynolds number and high Knudsen number formed due to smaller diameter. In present study, experimental studies were carried out to a closed end (downstream) Micro Shock Tube with two different diameters were investigated to understand the flow characteristics. Pressure values were measured at different locations inside the driver and driven section. The results obtained show that with the increase in diameter the shock propagation velocity increases as well as the effect of reflected shock wave will be more significant under the same diaphragm rupture pressure.

초 록

현재 Micro Shock Tube는 다양한 공학응용분야에 적용되고 있으며, 특히 우주항공 및 연소기술 그리고 약물전달 등의 분야에서 광범위한 잠재력을 가진 장치 중 하나이다. 그러나 Micro Shock Tube에서의 유동 특성은 작은 직경으로 인해 형성되는 매우 낮은 Reynolds Number와 높은 Knudsen Number의 영향으로 일반적으로 잘 알려진 Macro Shock Tube의 유동 특성과 상이하게 나타난다. 본 연구에서는 이러한 Micro Shock Tube의 유동 특성을 상세히 연구하기 위해 직경이 다른 두 가지 Micro Shock Tube의 실험을 수행하였다. 충격파 전파를 측정하기 위해 고압관의 파막압력 그리고 저압관의 세 지점에 센서를 설치하여 압력을 측정하고 분석하였다. 본 연구로부터, 동일한 파막압력에서 Micro Shock Tube 직경의 증가에 따라 충격파 전파속도가 증가하였고, 반사파의 영향도 더 크게 받았다.

Key Words: Shock Wave(충격파), Reflected Shock Wave(반사충격파), Micro Shock Tube(미소충격파관), Diaphragm(격막), Shock Wave Propagation(충격파 전파)

Received 30 November 2012 / Revised 30 July 2013 / Accepted 7 August 2013

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 / <http://journal.kspe.org>

[이 논문은 한국추진공학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 22-23, 여수 디오션리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

최근 Micro Shock Tube는 다양한 공학 응용

분야에서 적용되고 있으며, 특히 우주항공 및 연소기술 등에서 광범위한 잠재력을 가진 장치 중 하나이다[1]. 이러한 Micro Shock Tube는 일반 충격파관과 같은 원리로, 고압관과 저압관의 압력차를 이용하여 격막을 순간적으로 파막시켜 충격파를 발생시킨다.

Micro Shock Tube는 초기압력비나 파막과정 등이 충격파관 내부에서 발생하는 비정상 유동장(충격파나 접촉면 전파 특성 등)에 큰 영향을 미치게 되며, 매우 작은 직경으로 인해 높은 Knudsen Number 및 낮은 Reynolds Number가 형성되며 부피에 비해 표면적의 비율이 높은 특성을 가져 기존의 Macro Shock Tube 내부유동과는 상이하게 나타난다[2-4].

현재, Micro Shock Tube는 영국 및 미국 등지에서 연구 및 개발이 활발하게 이뤄지고 있지만, 국내에서는 몇몇의 연구소나 대학에서 Macro Shock Tube에 관한 연구만이 이뤄지고 있는 실정이다. 종래 Macro Shock Tube의 유동특성에 관한 연구는 수많은 연구자들의 연구를 통해 잘 알려져 있지만, Micro Shock Tube에 관한 연구 결과나 실험데이터는 충분하지 않으며, 다양한 방법의 적절한 활용을 위해 Micro Shock Tube의 유동 특성에 관한 연구가 절실한 상태이다 [5,6].

본 연구에서는 선행되었던 Micro Shock Tube의 끝단이 열린 상태의 실험적 연구와는 달리, 끝단을 막은 상태에 관한 실험을 수행하였다. 실험에서는 직경이 다른 두 가지 Micro Shock Tube를 사용했으며, 초기 압력비와 격막을 달리

하여 관내에 발생하는 충격파에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 Micro Shock Tube의 끝단을 막고 실험을 수행하였으며, 사용된 Micro Shock Tube는 고압관과 저압관, 그리고 고압관과 저압관 사이에 위치한 격막으로 구성되며, Fig. 1에 실험장치의 개략을 나타내었다. 고압관은 압축기와 연결되어 압축된 공기가 고압관으로 주입되면, 고압관의 압력 상승으로 인해 장착된 격막이 자연 파막 되고, 그로 인해 형성된 충격파는 압력차로 인해 저압관으로 이동하게 된다. 이때, 각 지점에서의 압력거동 및 충격파 속도를 측정하기 위해 스트레인게이지 형식의 압력 센서(XT-190 series)를 총 네 지점에 설치하여 신호를 검출하였다. 이 때 사용한 센서는 Fig. 2(a)에 나타냈으며, 오차범위는 $\pm 1\%$ 이다. 그리고 사용한 격막재의 재질을 Table 1에 설명하였으며, 실제 사진을 Fig. 2(b)에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 Micro Shock Tube의 실

Table 1. List of different diaphragm materials.

Material	
Diaphragm	LLD-PE(Linear low-density polyethylene)
	PP(Poly Propylene)

Fig. 1 Schematic of the micro shock tube (closed).

Fig. 2 Pressure sensor (XT-190 series [Kulite]) and diaphragm.

제 사진은 Fig. 3에 나타내었으며, 총 길이 620 mm (고압관: 110 mm, 저압관: 510 mm), 직경 3 mm와 6 mm, 재질은 스테인리스로 제작하였다. 고압관에는 격막이 파막되는 압력을 측정하기 위해 격막에 인접한 위치에 Sensor0(P_0)를 설치하였으며, 저압관에는 충격파가 전파되는 것을 정성적으로 파악하기 위해 격막 위치에서부터 30 mm 떨어진 곳에 Sensor1(P_1) 그리고 그 지점으로부터 200 mm의 일정한 간격으로 Sensor2(P_2)와 Sensor3(P_3)를 설치하여 실험을 수행하였으며, LabVIEW(NI)를 사용해 데이터를 받아들이며 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Micro Shock Tube에서의 격막이 파막되어 만들어진 관내 충격파는 저압관의 압력변화를 통해서 확인할 수 있다.

Fig. 4, 5는 직경이 다른 두 가지의 Micro Shock Tube의 충격파 실험으로 얻어진 결과로 시간에 따른 각 지점에서의 압력 변화를 무차원화하여 나타낸 그래프이다. 각 Case를 구분하는 $P_{0,max}$ 는 격막이 파막되는 순간의 압력이며 P_1 , P_2 , P_3 는 저압관내 각 지점에서 측정된 압력이다. Fig. 4는 직경 3 mm Micro Shock Tube에서의 충격파 전파를 측정된 결과이다. 각 Case의 그래프는 같은 경향성을 보였으며, 파막압력의 증가에 따라 선형적으로 증가한다. 각 그래프의 오른쪽에 위치한 저압관내 압력 선도가 단조롭게 변화하였으며, 이것은 반사 충격파의 영향이 작다는 것을 말해 준다. 그리고 Micro Shock Tube의 끝단이 막혀 있으므로 전 구간에서의 압력이 시간의 흐름에 따라 점점 증가하다가 어느 시점에서부터 고압관과의 압력 평형을 이루어 압력이 일정해진다. 격막이 파막된 순간부터 압력이 일정해지는 시간은 약 150 ms로 파막압력이 변화해도 일정하게 나타난다.

Fig. 5는 직경 6 mm Micro Shock Tube에서의 충격파 전파를 측정된 결과이다. 전술한 Fig. 4와 같이 네 개의 각 Case 모두 같은 경향성을

Fig. 3 Micro shock tube (closed) in ANU.

Fig. 4 Pressure-time diagram ($D=3$ mm).

보였으며, 파막압력의 증가에 따라 선형적으로 증가한다. 그러나 격막이 파막 된 순간부터 고압 관과의 압력 평형을 이루는 시간은 약 500 ms로 앞선 결과와 차이가 나는데, 이것은 Micro Shock Tube의 직경이 증가하기 때문이라 판단 된다. 그리고 저압관내 압력선도 또한 직경이 3 mm 일 때에 비해 크게 진동하면서 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6, 7에는 관내에서의 발생하는 충격파 전파를 x-t 선도로 나타냈다. 선도에서 반사 충격

파 전파를 보면, 변화량은 크지 않지만 파막압력의 증가에 따라 두 그래프 모두 속도가 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 이 결과를 이용하여 동일한 압력비 일 때의 반사 충격파 전파를 Fig. 8에 비교하여 나타냈다. Fig. 8을 보면 직경이 더 큰 경우 충격파와 반사 충격파 전파 속도 모두 더 빠르게 나타났다. 이와 같은 결과로 Fig. 4, 5의 저압관에서 형성되는 압력선도에 대해 설명할 수 있는데, 충격파가 지나간 후 관내에서는 압력강하가 발생되고, 이때 되돌아오는 반사 충격파의 영향을 다시 받아 압력이 상승되는 현상이 반복되어 선도가 진동하며 증가

Fig. 5 Pressure-time diagram (D=6 mm).

Fig. 6 Shock reflection along axis (d=3 mm).

Fig. 7 Shock reflection along axis (d=6 mm).

Fig. 8 Shock reflection along axis for different diameter at pressure ratio equal to 4.5.

Fig. 9 Sensor locations for the experimental study.

Table 2. Data sheet for different rupture conditions (D=3 mm).

Case	Diaphragm	Number of diaphragms	$P_{0,max}$ (bar)	U_{1-2} (m/s)	U_{2-3} (m/s)
(a)	L	1	3.15	372.16	344.83
(b)	L	2	4.83	395.1	374.62
(c)	L	3	7.14	418.16	392.16
(d)	P	2	7.34	434.78	407.36

Table 3. Data sheet for different rupture conditions (D=6 mm).

Case	Diaphragm	Number of diaphragms	$P_{0,max}$ (bar)	U_{1-2} (m/s)	U_{2-3} (m/s)
(e)	L	1	2.05	363.64	338.98
(f)	L	2	2.79	370.37	363.64
(g)	L	3	4.12	408.16	377.36
(h)	P	1	4.7	426.19	384.62

하게 되는데, 직경이 3 mm일 때보다 직경이 6 mm 일 때 이런 현상의 영향을 더 크게 받았다.

실험에서 얻어진 데이터와 전술한 결과들을 이용하여 각 Case들의 파막조건과 파막압력 그리고 파막압력에 따른 저압관내에서 충격파 전파속도 U_s 를 Table 2, 3에 나타냈다. 두 표에는 충격파 전파속도 U_s 를 Fig. 9와 같이 저압관을 두 구간으로 나누어 U_{1-2} 와 U_{2-3} 로 나타냈다. Table 2, 3을 비교해 보면 동일한 격막 조건일 경우, 직경 6 mm 일 때보다 직경이 3 mm 일 때 더 큰 파막 압력이 발생했고, 그로 인해 충격파 전파 속도 또한 모든 구간에서 더 빠르게 나타났다. 이 결과를 이용하여 같은 파막압력 조건에서의 속도 비교를 위해 Fig. 10에 그래프로 나타냈다. 동일한 파막압력 일 경우 1-2와 2-3의 모든 구간에서 직경 6 mm 일 때 더 빠른 충격파 전파속도가 발생된다. 즉, 같은 압력비 일 때 직경이 더 작은 경우 충격파의 전파 속도가 느리게 나타났다. 이 결과는 본 연구에 사용된 Micro Shock Tube의 직경(3 mm, 6 mm) 차이로 인해 관 내 Reynolds Number가 2배의 차이가 나게 되며, 따라서 Reynolds Number가 작은 경우($d=3$ mm) 충격파 전파에 미치는 관 마찰(유체점성)의 영향이 상대적으로 증가하여 충격파 전파특성이 달라지게 되어 나타나는 현상이라 판단된다.

Fig. 10 Relationship between $P_{0,max}$ and U_s .

4. 결 론

본 연구에서는 Micro Shock Tube에서 발생하는 충격파 특성을 실험적으로 조사하기 위하여, 직경이 다른 두 개의 Micro Shock Tube의 파막 압력을 변화시켜 실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) Micro Shock Tube에서 초기 압력비는 충격파 전파 및 압력 거동 등 관내유동에 영향을 미친다.
- (2) 초기 압력비의 큰 변화량에 비해 저압관에서 측정되는 관내유동의 변화량은 크지 않다.
- (3) 동일한 초기 압력비 일 경우, 직경이 작을수록 충격파 전파 속도가 더 느리게 발생한다.
- (4) 직경이 더 큰 Micro Shock Tube에서 반사 충격파 전파속도가 더 빠르게 나타나 저압관에서의 충격파 전파에 더 큰 영향을 주었다.

후 기

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

References

1. Mirshekari, G. and Brouillette, M., "One-Dimensional Model for Microscale Shock Tube Flow," *Shock Waves*, Vol. 19, pp. 25-38, 2009.
2. Rajesh, G., Kim, H.D., Setoguchi, T. and Raghunathan, S., "Performance Analysis and Enhancement of the Ballistic Range," *Journal of Aerospace Science, Part G*, Vol. 221, pp. 649-659, 2007.
3. Arun, K.R. and Kim, H.D., "Computational Study of the Unsteady Flow Characteristics of a Micro Shock Tube," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, No. 2, pp. 451-459, 2012.
4. Arun, K.R. and Kim, H.D., "Numerical Visualization of the Unsteady Shock Wave Flow Field in Micro Shock Tube," *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 10, No. 1, pp. 40-46, 2012.
5. Kim, H.D., "Shock Wave Phenomena in Fluid Engineerings(I)," *Transactions of the KSME*, Vol. 169, pp. 961-976, 1994.
6. Park, J.O., Kim, G.Y. and Kim, H.D., "An Experimental Study on Micro Shock Tube Flow," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 16, No. 5, pp. 74-80, 2012.