

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.5.074>

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 like micro combustion, micro propulsion, particle delivery systems. But in order to efficiently apply Micro Shock Tube to such areas require 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 micro shock tubes of two diameters 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 Micro Combution, Micro Propulsion, Particle Delivery Systems 등 다양한 공학 응용 분야에서 Micro Shock Tube의 중요성이 커지고 있다. 그러나 여러 분야에 Micro Shock Tube를 효율적으로 적용하기 위해서는 관내유동과 충격특성에 대한 상세한 지식을 필요로 한다. 경계층과 같은 많은 요소들 때문에 Micro Shock Tube 내부의 낮은 Reynolds Number와 높은 Knudsen Number가 형성되며, 이때의 충격파 전파는 기존의 Macro Shock Tube와 상이하게 나타난다. 본 연구에서는 Micro Shock Tube에서의 충격파 전파와 유동특성을 조사하기 위해 직경 3 mm와 6 mm의 두 가지 Micro Shock Tube를 이용하여 실험을 수행하였으며, 압력은 고압관의 파막압력과 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)

접수일 2012. 5. 23, 수정완료일 2012. 9. 7, 게재확정일 2012. 9. 13

* 학생회원, 안동대학교 기계공학과

** 중신회원, 안동대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2012년도 춘계학술대회(2012. 5. 17-18, 금오공과대학교) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

일반적으로 Shock Tube는 관에 격막을 설치하여 고압관과 저압관으로 구분하고, 구분된 관

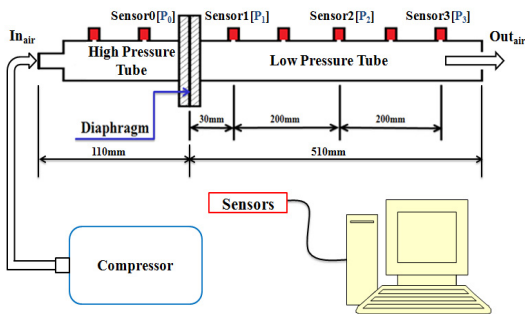


Fig. 1 Schematic of the micro shock tube

내의 압력차를 이용하여 격막을 순간적으로 파막시켜 충격파를 발생시키는 장치이다[1]. 그러나 오늘날 공학계 및 과학계에서는 시스템의 크기와 무게를 최대한 줄이는 것이 주된 과제중 하나이며, Shock Tube의 규모를 줄인 형태인 Micro Shock Tube는 이러한 문제에 대한 방안 중 하나이다.

Micro Shock Tube는 초기압력비나 과막과정 등이 충격파 관내부에서 발생하는 비정상 유동장(충격파나 접촉면 전파 특성 등)에 큰 영향을 미치게 되고, 매우 작은 직경으로 인해 높은 Knudsen Number 및 낮은 Reynolds Number가 형성되며 부피에 비해 표면적의 비율이 높은 특성을 가진다. 이러한 특성으로 인해 기존의 Macro Shock Tube 내부유동과는 상이하게 나타난다[2, 3, 4].

Micro Shock Tube는 연소 기술 및 우주항공 분야에서 광범위한 잠재력을 가지고 있으며, 현재 영국 및 미국 등지에서 연구 및 개발이 활발히 이뤄지고 있다[5]. 그리고 최근에는 Micro Combustion, Micro Propulsion, Particle Delivery Systems 등 다양한 공학 응용 분야에서 그 중요성이 커지고 있다[6]. 하지만 종래에 행해진 많은 Macro Shock Tube의 연구결과들과는 달리 Micro Shock Tube에 관련된 실험결과는 아직 충분하지 않고, 잘 알려져 있지 않은 상태이다.

Micro Shock Tube를 여러 공학 응용 분야에 더욱 효율적으로 적용하기 위해서는 내부유동과 충격특성에 대한 상세한 지식이 필요하며, 본 연구는 Micro Shock Tube의 효율적인 내부 유동

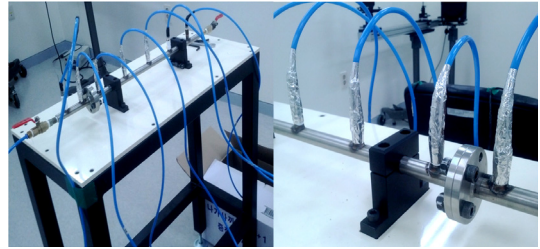


Fig. 2 Micro shock tube in ANU

제어를 위해 관내 유동 특성에 대한 기초적인 데이터를 수집하기 위해 수행하였다.

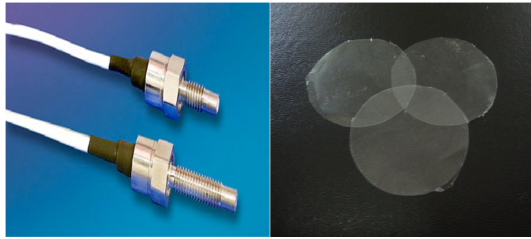
직경이 다른 두 가지의 Micro Shock Tube를 설계/제작하였으며, 과막압력 변화에 영향을 미치는 서로 다른 두 격막재를 사용하여 실험을 수행하였다. 이때, 얻어진 충격파 강도를 이용하여 충격파관 이론해석을 수행하였으며, 도출한 이론 결과값과 실험 결과값 사이에 어떠한 차이를 가지는지 비교하고 분석해 보았다.

2. 실험방법

Figure 1은 본 연구에서 사용된 Micro Shock Tube의 개략도이며 그 실제 사진을 Fig. 2에 나타냈다. Micro Shock Tube는 고압관과 저압관, 그리고 고압관과 저압관 사이에 위치한 격막으로 구성되어 있으며 총 길이 620 mm (고압관 : 110 mm, 저압관 : 510 mm), 직경 3 mm와 6 mm, 재질은 스테인리스로 제작하였다. 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 series)를 총 네 지점에 설치하여 신호를 검출하였다. 이 때 사용한 센서는 Fig. 3(a)에 나타냈으며, 오차범위는 $\pm 1\%$ 이다. 고압관에는 격막이 파막되는 압력을 측정하기 위해 격막에 인접한 위치에 Sensor0(P_0)를 설치하였으며, 저압관에는 충

Table 1. List of different diaphragm materials

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



(a) Pressure Sensor (b) Diaphragm

Fig. 3 Pressure sensor (XT-190 series [Kulitel]) and Diaphragm

격파가 전파되는 것을 정성적으로 파악하기 위해 격막 위치에서부터 30 mm 떨어진 곳에 Sensor1(P₁)을 설치하고, 그 지점으로부터 200 mm의 일정한 간격으로 Sensor2(P₂)와 Sensor3(P₃)를 설치하였다. 그리고 LabVIEW(NI)를 사용하여 데이터를 받아들이고 분석하였다. 본 연구에서는 Fig. 3(b)의 격막재를 절단하여 사용하였으며, 강도가 다른 두 가지 재료의 격막사용으로 파막압력(P₀)을 다르게 하였다. Table 1에 격막재질에 대해 설명하였다.

3. Shock tube 유동의 이론해석

본 연구에서 수행된 Micro Shock Tube 실험으로 얻어진 충격파 전파 특성과 일반 충격파관 이론결과를 비교 분석하기 위해 문헌[7, 8]을 참고하여 이론해석을 수행하였다. 아래 식에서 사용된 구간은 Fig. 4에 도시한 바와 같다.

먼저, 고압관과 저압관의 초기압력비(P₄/P₁)는

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

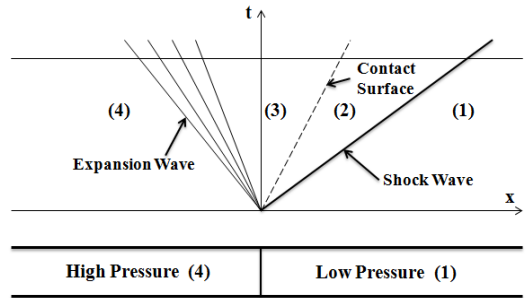


Fig. 4 Motion in a shock tube

Equation 1과 같이 비열비(γ)와 충격파 마하수(M_s)로 구할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 P₄/P₁이 실험시 얻어진 저압관의 초기압력(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 같으며 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 Case의 초기압력비를 이용하여 동일한 조건의 일반 충격파관 이론값을 도출하였으며, 그 결과를 이용하여 실험값과 비교하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Figure 5, 6은 직경이 다른 두 가지의 Micro Shock Tube에서 얻어진 결과를 각 Case에 따른 각 지점에서의 압력 변화를 과막압력 $P_{0,max}$ 로 무차원화하여 나타낸 그래프이다. 이때, $P_{0,max}$ 는 격막이 과막되는 압력이며 P_1, P_2, P_3 는 저압관내 각 지점에서의 압력이다. 격막이 과막 되어 고압실로부터 고압의 공기가 배출되면 저압관을 통해 대기로 배출되는데 그 때 발생된 충격파 전파는 P_1, P_2, P_3 세 지점의 압력변화를 통해서 확인할 수 있다.

Figure 5, 6의 그래프를 보면 같은 직경일 때, 각각 네 개의 Case들은 동일한 형태의 그래프가 형성되었으며, 그 수치 차이는 과막압력의 증가에 따라 선형적으로 변화한다. 그리고 직경이 3 mm일 때보다 6 mm일 때 각 지점에서 압력강 강 최저값이 더 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이 결과로 직경이 6 mm일 때 팽창파의 영향을 더 크게 받는다는 것을 알 수 있다. 그리고 각 Case들의 격막조건과 각 지점에서의 P_{max} 값을 Table 2, 3에 각각 정리하여 나타내었다. 두

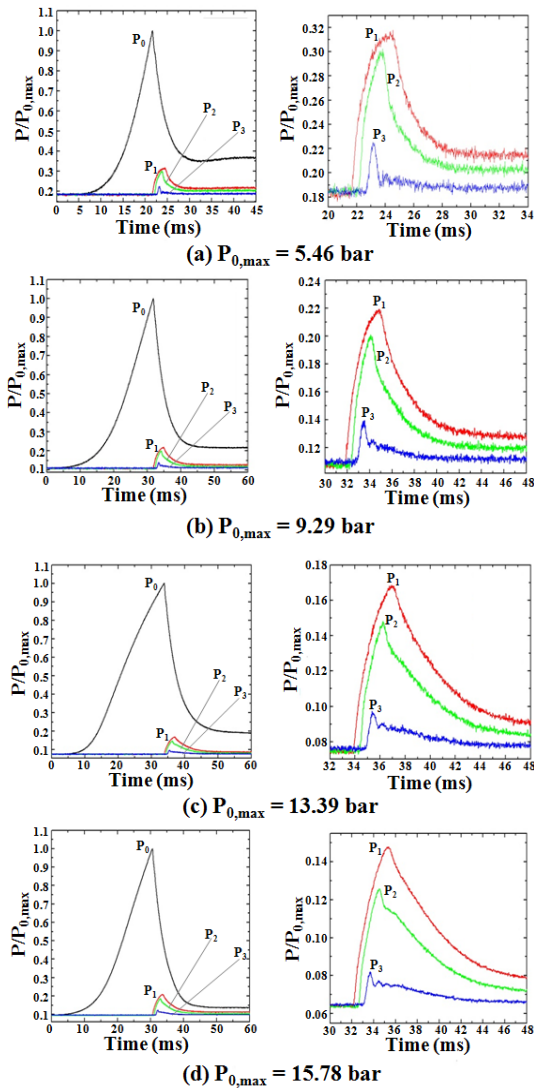


Fig. 5 Pressure-time diagram (D=3 mm)

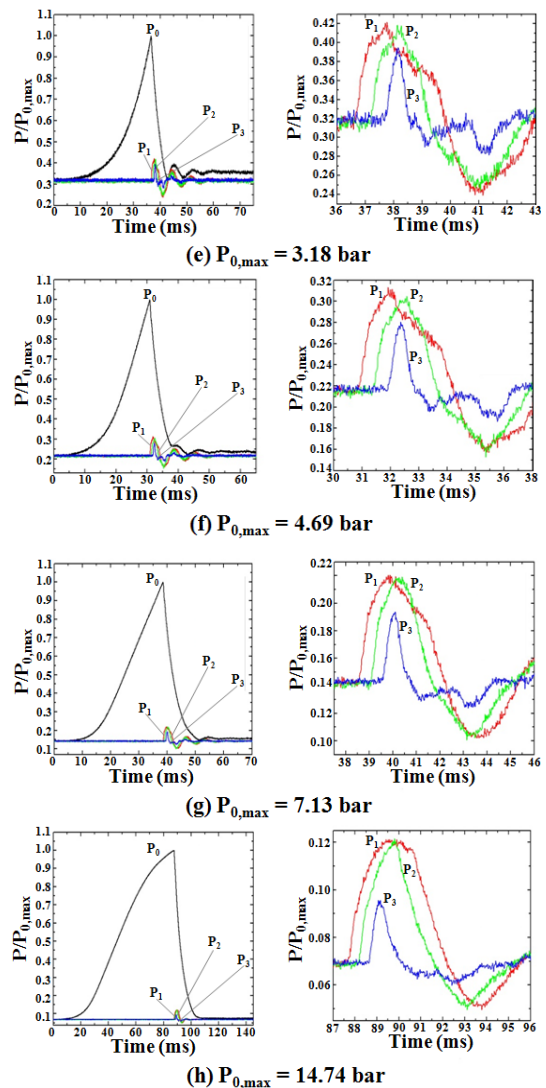


Fig. 6 Pressure-time diagram (D=6 mm)

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

단위 : bar						
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)	L	3	13.39	2.26	1.98	1.3
(d)	P	2	15.78	2.33	1.99	1.31

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

단위 : bar						
Case	격막	격막수	P _{0,max}	P _{1,max}	P _{2,max}	P _{3,max}
(e)	L	1	3.18	1.34	1.33	1.25
(f)	L	2	4.69	1.47	1.43	1.32
(g)	L	3	7.13	1.57	1.56	1.38
(h)	P	2	14.74	1.79	1.78	1.44

Table 4. U_{th} and U_{exp} versus rupture pressure (D=3 mm)

단위 : m/s				
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)	13.39 bar	1582	408	373
(d)	15.78 bar	1721	435	401

Table 5. U_{th} and U_{exp} versus rupture pressure (D=6 mm)

단위 : m/s				
Case	파막압력(P _{0,max})	U _{th}	U _{1-2,exp}	U _{2-3,exp}
(e)	3.18	730	392	370
(f)	4.69	908	400	384
(g)	7.13	1137	408	386
(h)	14.74	1661	434	409

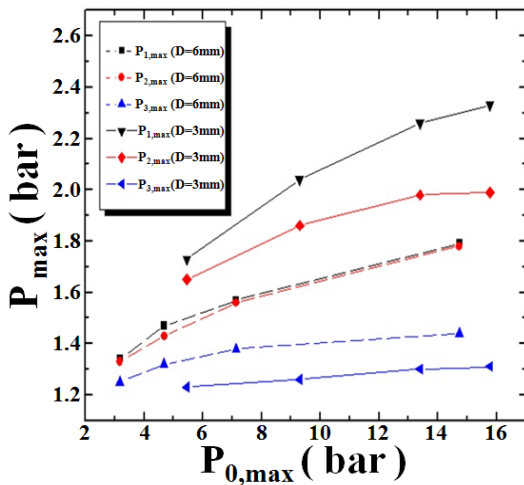


Fig. 7 Relationship between P₀ and P_{max}

Table을 비교해 보면 4가지의 격막조건을 직경이 다른 두 개의 Micro Shock Tube에 동일하게 적용해 실험을 수행하였으며, 파막압력의 증가에 따라 저압관내 각 지점 P_{max}값 또한 증가함을 알 수 있다. 그리고 같은 격막조건일 경우 직경이 6 mm일 때 더 작은 압력에서 파막되었다. 이러한 결과를 Fig. 7에서 보기 쉽게 나타내었다.

다. Fig. 7을 통해 보면 같은 파막압력일 경우 직경이 6 mm일 때 더 낮은 관내압력이 형성되고, P_{1,max}와 P_{3,max}의 압력차 또한 더 작다는 것을 알 수 있다. 즉, 파막압력이 동일할 경우 관 끝단에서의 압력은 직경 6 mm의 Micro Shock Tube가 더 크다.

실험으로 얻어진 초기 압력비를 이용하여 앞서 언급한 일반 충격파관에서의 이론해석을 통해 이론값을 도출하고, 실험값과 함께 Table 4, 5에 정리하여 나타냈다. Table 4, 5에서는 본 실험에서 사용된 Micro Shock Tube에 Sensor1과 Sensor2 사이의 구간 충격파 속도를 U₁₋₂, Sensor2와 Sensor3 구간 충격파 속도를 U₂₋₃으로 지정하여 실험값을 기록하였다. 그리고 얻어진 결과 값들을 이용하여 Fig. 8, 9에 x-t 선도로 나타내고 비교하였다. x-t선도를 보면 이론값과 실험값이 거의 일치하는 일반 충격파관에서의 결과와는 달리 각 Case들 모두 실험값과 이론값의 큰 차이를 볼 수 있으며, 그 차이는 파막압력이 증가 할수록 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 얻어진 Micro Shock Tube 관내 각 구간에서의 충격파 속도 U_s를 이용하여 파막압력에 따른 U_s선

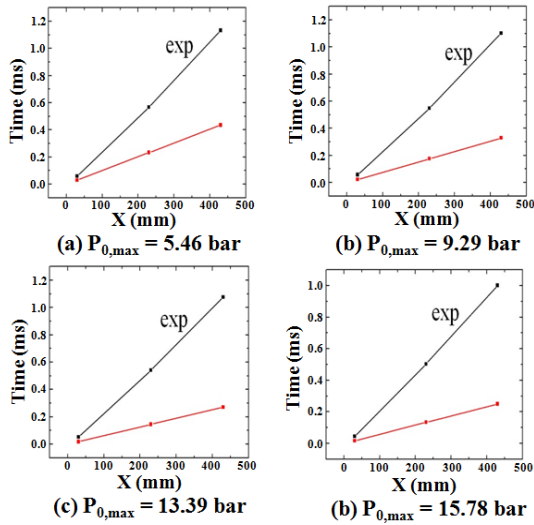


Fig. 8 x-t Diagram (D=3 mm)

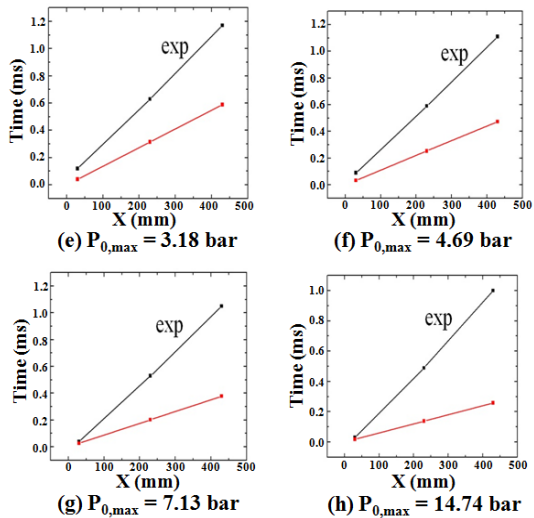


Fig. 9 x-t Diagram (D=6 mm)

도를 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10을 보면 두 개의 Micro Shock Tube 모두에서 과막압력이 증가함에 따라 충격파 속도 또한 증가했고, 직경이 3 mm일 때보다 6 mm 일 때, 두 구간 모두 더 빠른 충격파속도가 발생했다. 또한, 1-2 구간과 2-3 구간에서의 속도차이는 평균적으로 직경이 3 mm일 때 30 m/s, 직경이 6 mm일 때 20 m/s로 직경이 작을 때 더 큰 감속이 발생했다. Fig. 10에서 얻어진 그래프를 다시 이론 충격파 속도

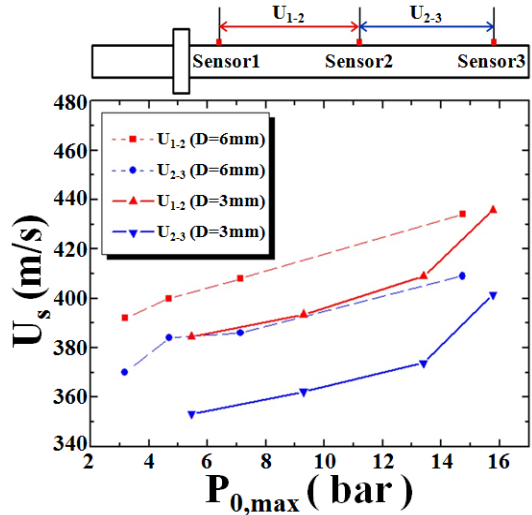


Fig. 10 Relationship between P_0 and U_s

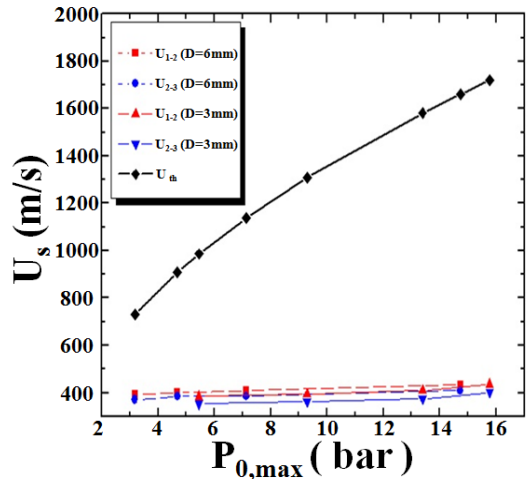


Fig. 11 Relationship between $P_{0,max}$ and U_s

U_{th} 와 함께 Fig. 11에 나타내고 비교했다. 직경이 3 mm와 6 mm 두 경우 모두 이론 충격파 속도와 큰 차이를 가졌으며, 그 차이는 과막압력의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 앞에서의 x-t 선도와 $P_{0,max}$ - U_s 선도의 결과로, 직경이 더 작은 경우 관내 충격파 속도의 감속이 더 크게 발생했으며, 두 Micro Shock Tube 모두 과막압력이 증가하여 충격파 속도가 빨라짐에 따라 관내에서 작용하는 내부마찰 또한 증가하였다. 이 때, 발생하는 내부마찰은 Micro Shock Tube의 작은

직경 때문에 Reynolds Number가 매우 작아 점성의 영향이 상대적으로 증가하여 발생하는 경계층 효과에 지배적인 영향을 받은 것이라 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 Micro Shock Tube의 내부 유동을 실험적으로 조사하기 위하여, 직경이 다른 두 개의 Micro Shock Tube에 두 가지 격막을 사용하여 파막 압력을 변화시켜 실험을 수행하였고, 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) 동일한 초기 조건을 가질 때, Micro Shock Tube 유동에서는 Macro Shock Tube 유동보다 낮은 충격파 속도 및 압력이 발생된다.
- (3) 같은 파막압력을 가질 때 직경 6 mm의 Micro Shock Tube 관내에서 더 큰 충격파 속도가 발생했고, 직경 3 mm의 Micro Shock Tube에서 충격파 감속 및 압력강하가 더 크게 발생하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. Rajesh, G., Lee, J. M. and Kim, H. D., "A Theoretical Study of Shock Tube Effect on the Ballistic Range Performance," 대한기계학회 추계학술대회, 2005, pp.1032-1037
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. 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
4. Arun, K. R. and Kim, H. D., "Numerical Visualization of the Unsteady Shock Wave Flow Field in Micro Shock Tube," Journal of KSV, Vol. 10, No. 1, 2012, pp.40-46
5. Mirshekari, G., Brouillette, M., "One-Dimensional Model for Microscale Shock Tube Flow," Shock Waves, Vol. 19, No. 1, 2009, pp.25-38
6. Arun, K. R., Kim, H. D. and Setoguchi, T., "Computational Study of Shock Wave Propagation and Reflection in a Micro Shock Tube," International Conference on Heat Transfer, 9th, 2012
7. Liepmann, H. W. and Roshko, A., Elements of Gasdynamics, Dover Books on Engineering, 2001
8. 노오현, 압축성 유체 유동, 박영사, 2004