

Micro-Shock Tube 유동에 대한 실험적 연구

박진욱** · 김규완* · Md.Alim Iftakhar Rasel* · 김희동**
* 안동대학교 기계공학과, ** 한국건설기술연구원 화재안전연구소

Experimental Study of Micro-Shock Tube Flow

Jin-Ouk Park*, Gyu-Wan Kim*, Md. Alim Iftakhar Rasel* and Heuy-Dong Kim**

* Dept. of Mechanical Engineering, Andong Nat'l Univ.

** Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

(Received January 23, 2014 ; Revised March 12, 2015 ; Accepted March 15, 2015)

Key Words: Unsteady Flow(비정상 유동), Shock Wave(충격파), Micro Shock Tube(미소 충격파관), Attenuation(감쇠), Diaphragm(격막), Initial Pressure Ratio(초기 압력비)

초록: Micro shock tube에서 발생하는 비정상파 거동을 실험적으로 조사 하기위해 파막 실험을 수행하였다. 실험은 스테인리스 재질의 micro shock tube를 사용하였으며, 총 8개의 압력센서를 설치하여, 충격파관에서 발생하는 충격파 및 팽창파를 측정하였다. 초기 압력비는 6.3에서 30.5까지 변화시켰으며, 관의 직경은 3mm와 6mm로 하였다. 그리고 두 가지 재질의 격막을 사용하여 격막 조건을 다양하게 실험을 수행하였다. 그 결과로부터 초기 압력비 및 관 직경의 증가에 따라 관내에서 발생하는 충격파 강도는 커지며, 가장 얇은 재질의 격막 조건에서 가장 큰 충격파 강도가 발생했다. 그리고 충격파 감쇠는 관의 직경에 가장 큰 영향을 받았다.

Abstract: The flow characteristics in micro shock tube are investigated experimentally. Studies were carried out using a stainless steel micro shock tube. Shock and expansion wave was measured using 8 pressure sensors. The initial pressure ratio was varied from 4.3 to 30.5, and the diameter of tube was also changed from 3mm to 6mm. Diaphragm conditions were varied using two types of diaphragms. The results obtained show that the shock strength in the tube becomes stronger for an increase in the initial pressure ratio and diameter of tube. For the thinner diaphragm, the highest shock strength was found among varied diaphragm condition. Shock attenuation was highly influenced by the diameter of tube.

- 기호설명 -

하첨자

P_4/P_1	: 초기 압력비(-)	1	: 저압관
P_2/P_1	: 충격파 강도(-)	2	: 충격파-접촉면 영역
U	: 전파속도(m/s)	3	: 접촉면-팽창파두 영역
M	: 마하수(-)	4	: 고압관
a	: 음속(m/s)	s	: 충격파
$\Delta P_s / \Delta P_{s,i}$: 충격파 감쇠(-)	p	: 접촉면
x	: 흐름 방향의 거리(mm)	EH	: 팽창파 파두
D	: 관의 직경(mm)		
γ	: 비열비(-)		

1. 서론

Micro shock tube는 발생하는 유동특성에 점성의 영향이 현저하게 증가하고, 자유분자 유동의

영향이 크게 나타나게 되는 비교적 작은 직경의 충격파관으로, 현재 micro 노즐, micro 터빈 및 입자전달 장치 등 짧은 시간에 고온 및 고속의 유동이 필요한 여러 분야의 장치에 다양하게 적용되고 있다. 그리고 micro shock tube는 현대 공학 및 과학계의 주된 과제 중 하나인 장치의 소형화 즉 구조적 복잡성을 단순화하고 중량을 줄일 수 있는 상당한 방법 중 하나로 특히 우주항공 분야에 광범위한 잠재력을 가지고 있으며, 미국 및 영국 등지에서 활발한 연구가 진행되고 있다.^(1,2) 국내에서도 최근 우주항공 분야의 성장과 더불어 많은 관심을 받고 있으나 종래 연구에서는 일반 충격파관에 관한 연구만이 활발하게 이뤄진 실정이며, 아직 micro shock tube에 관한 연구 결과는 충분하지 않은 상태로 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

Micro shock tube의 기본 원리는 급속 열림 밸브나 격막에 의해 분리된 고압관과 저압관 간의 압력차에 의해 파막 후 고압관으로부터 비교적 낮은 압력 상태인 저압관으로 비정상 유동장(충격파, 접촉면, 팽창파)이 발생 된다.⁽³⁾ 그러나 상기에서 설명한 바와 같이 micro shock tube는 관의 작은 직경으로 인해 일반 충격파관에서의 유동과 달리 부피에 대한 표면적의 비가 크게 나타나며, 레이놀즈 수가 비교적 작아지고, 유동직경과 분자평균자유행로의 비인 누센 수가 커지게 된다. 그로인해 운동량 손실이 더 크게 발생하고 분자력이 강해지며, 전파되는 충격파에 의해 만들어진 유동 경계층이 유동 체적의 대부분을 차지하게 되어 유체점성 효과에 의한 손실이 증가한다.⁽⁴⁻⁶⁾ 이런 특성으로 인해 일반 충격파관에서의 비정상파 거동과 상이한 유동이 관내에 발생하게 되어 기존의 일반 충격파관 이론만으로 micro shock tube에서 발생하는 비정상 유동장을

예상하는 것은 정확하지 않다. 이 연구에서는 micro shock tube의 관내에서 전파되는 유동특성을 조사하기 위해 실험적 연구를 수행하였으며, 관의 직경 및 초기 압력비 그리고 격막 재질을 다양하게 변화시켜 결과를 도출하였으며, 그 결과를 일반 충격파관의 이론 해석 결과와 비교 분석하여 나타냈다.

2. 이론해석

이 연구에서 수행된 micro shock tube 파막 실험으로부터 얻어진 실험결과와 기존의 일반 충격파관 이론결과를 비교 분석하기 위해 문헌⁽⁷⁻⁹⁾을 참고하여 이론해석을 수행하였다. 아래의 모든 식에서 사용된 아래첨자에 대한 구간은 Fig. 1에 도시한 바와 같다.

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{P_2}{P_1} \left[1 - \frac{(\gamma-1) \left(\frac{a_1}{a_4} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right)}{\sqrt{2\gamma} \sqrt{2\gamma + (\gamma+1) \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right)}} \right]^{\frac{-2\gamma}{(\gamma-1)}} \quad (1)$$

식 (1)에서 초기 압력비(P_4/P_1)와 음속비(a_1/a_4) 그리고 비열비(γ)를 이용하여 충격파 강도(P_2/P_1)를 계산할 수 있다. 여기서, 사용된 작동기체는 고압관과 저압관 모두 공기이므로, 음속비는 1이고, 비열비는 1.4이다. 그리고 초기 압력비는 실험 시 설정한 값을 이용하여 실험과의 조건을 동일하게 하였다.

$$U_s = a_1 \sqrt{\frac{\gamma+1}{2\gamma} \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right) + 1} \quad (2)$$

$$M_s = \sqrt{\frac{\gamma+1}{2\gamma} \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right) + 1} \quad (3)$$

$$a_1 = a_4 = \sqrt{\gamma RT} \quad (4)$$

$$U_p = \frac{a_1}{\gamma} \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right) \left(\frac{\frac{2\gamma}{\gamma+1}}{\frac{P_2}{P_1} + \frac{\gamma-1}{\gamma+1}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$U_{EH} = -a_1 \quad (6)$$

얻어진 충격파 강도를 이용하여 식 (2)~(6)에 대입하여 충격파 속도(U_s), 마하수(M_s), 접촉면 속도(U_p) 및 팽창파 속도(U_{EH}) 등을 계산할 수 있다. 여기서, 팽창파는 파두 속도만 나타내고 있으며, 작동 기체의 음속의 음수로 나타낸다.

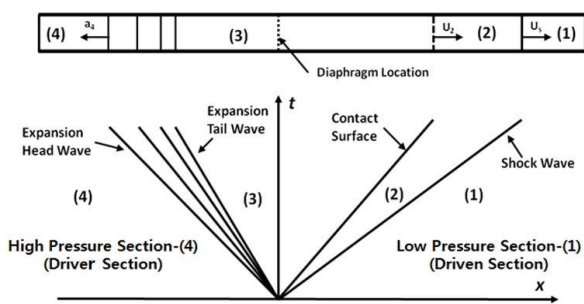


Fig. 1 Schematic diagram of shock tube wave propagation details

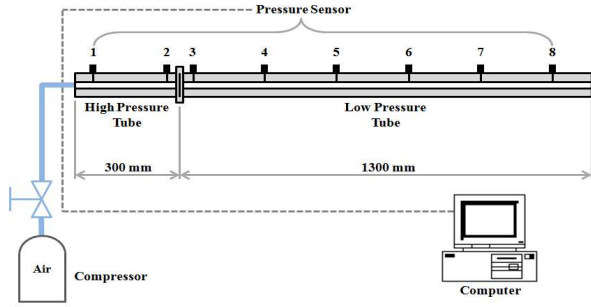


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

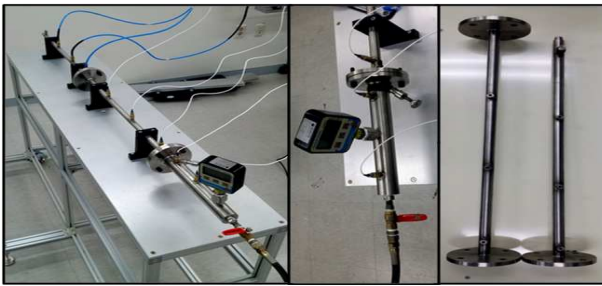


Fig. 3 Experimental setup of micro shock tube

$$\frac{\Delta P_s}{\Delta P_{s,i}} = 1 - \frac{0.115}{\left(\frac{U_s}{u_2}\right)^{1.4} \left(\frac{Da_2}{v_2}\right)^{0.2}} \left(\frac{x}{D}\right)^{0.8} \quad (7)$$

$$a_2 = \sqrt{\gamma RT_2} \quad (8)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1 + \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \frac{P_2}{P_1}}{1 + \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \frac{P_1}{P_2}} \quad (9)$$

관내에서 전파되는 충격파의 감쇠($\Delta P_s/\Delta P_{s,i}$)는 식 (7)를 이용하여 계산할 수 있다. 여기서 u_2 , v_2 , a_2 는 충격파 후면의 기체 전파 속도($u_2=U_p$), 동점성 계수 및 음속이다. 이 값들은 식 (8)과 (9)를 이용하여 구할 수 있다. 상기의 이론해석에서 식 (7)를 제외한 모든 식은 점성의 영향이 고려되지 않았다.

3. 실험방법

연구에서 사용된 실험 장치는 크게 압축기 및 데이터 수집용 컴퓨터 그리고 micro shock tube로 구성되며, 그 개략도와 실사진을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타냈다. 실험과정은 micro shock tube의 고압관과 저압관 사이에 격막이 장착되고, 연결

Table 1 Initial pressure ratios (D=3mm).

Case	Materials	Number of diaphragm	Initial pressure ratio(P_4/P_1)
(a)	Cellophane	1	6.3
(b)	Cellophane	1	10.1
(c)	Cellophane	2	20.3
(d)	Cellophane	3	30.5

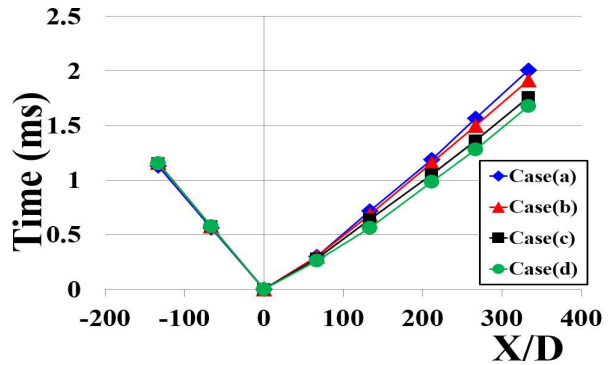


Fig. 4 Shock location along axis at different initial pressure conditions

된 압축기를 통해 고압관의 압력을 실험조건에 맞춰 설정한 후 격막을 파막한다. 이때, 파막은 수동 파막장치(바늘)를 사용하고, 저압관의 압력은 대기압으로 일정하게 한다.

사용된 micro shock tube는 고압관의 직경이 10mm이고, 저압관의 직경은 6mm와 3mm이며, 스테인리스 재질을 사용하여 제작 하였다. 총 길이는 1600mm(고압관 : 300mm, 저압관 : 1300mm)이며, 압력 측정을 위해 파막 지점으로부터 50mm 떨어진 위치에 첫 번째 센서를 설치하고, 각 센서를 200mm간격으로 총 8개(고압관 : 2개, 저압관 : 6개) 설치하여 신호를 수집 하였다. 사용된 압력센서(XT-190)는 스트레인게이지 형식이며, 오차범위는 $\pm 1\%$ 이다. 그리고 격막재는 cellophane과 PP (polypropylene) 두 가지 재질을 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 초기 압력비

이 실험에서는 직경 3mm micro shock tube에 파막 조건을 Table 1과 같이 설정하여, 초기 압력비에 따른 관내 유동 특성을 관찰 하였다. Table 1을 보면 초기 압력비의 증가에 따라 격막 수를

Table 2 Shock tube diameters

Case	Diameter (mm)	Materials	Initial pressure ratio(P_4/P_1)
(a)	3	Cellophane	6.0
(b)	6	Cellophane	6.0

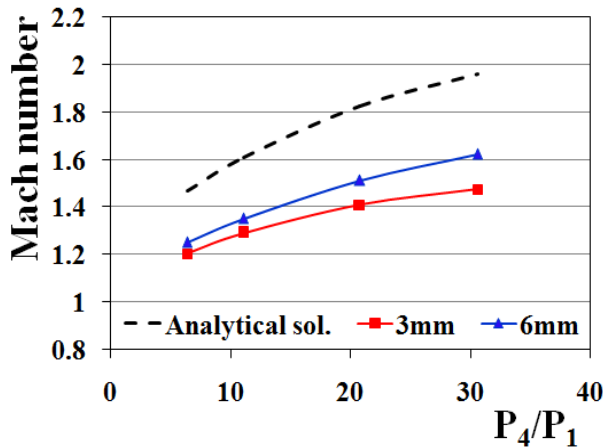


Fig. 5 Mach number distribution with varying initial pressure ratio

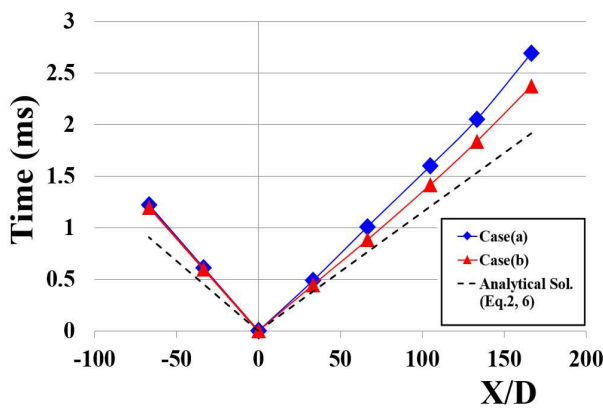


Fig. 6 Shock locations along axis for different tube diameters

증가시켰는데, 그 이유는 고압 Case에 격막을 한 장을 설치할 경우, 목표한 압력비에 도달하기 전 자연파막이 발생하였기 때문이다. 그리고 저압 Case에 격막을 여러 장 설치할 경우에는 완전 파막이 되지 않는 현상이 일어나 격막 수를 불가피하게 변화시켰다. 이것이 관내 유동에 영향을 미칠 것으로 예상 되지만, 실험이 고압에서 수행 되었으므로 그 영향이 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하고 결과를 고찰하였다.

Fig. 4에는 시간에 따른 충격파 전파 거리를 관의 직경으로 무차원화 하여 나타냈다. 그래프를

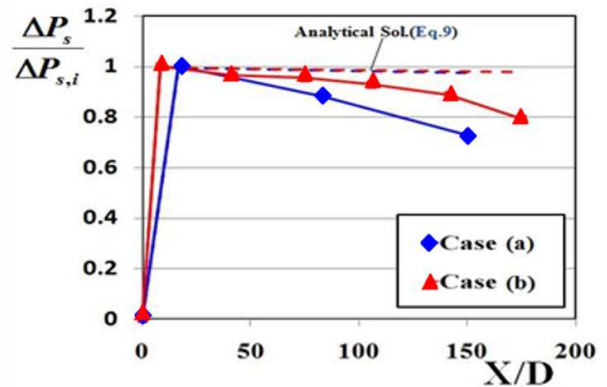


Fig. 7 Shock attenuations for different tube diameters

보면 초기 압력비가 증가함에 따라 충격파 전파 속도가 선형적으로 증가하고 있으며, 초기 압력비가 가장 큰 Case(d)에서 충격파가 가장 빠르게 전파되었다. 이에 반해, 고압관을 향해 전파하는 팽창파는 모든 Case에서 유사하게 나타났다. Fig. 5는 얻어진 x-t선도를 이용하여 관내에서 발생하는 충격파 전파 마하수를 계산하고, 그 결과를 초기 압력비와 관내 마하수의 관계로 나타낸 그래프이다. 그래프에 도시한 마하수는 저압관의 중간 지점에서 측정된 값이며, 이론해석결과 및 6mm의 micro shock tube에서 얻어진 결과값과 비교하였다. 그래프로부터 직경이 3mm와 6mm인 두 개의 관에서 모두 상기의 결과와 같이 초기 압력비의 증가에 따라 마하수는 증가하고 있으며 전체적으로 3mm의 관에서 더 작은 마하수가 발생했다. 그리고 그 차이는 초기 압력비가 증가할수록 더 크게 발생된다. 두 개의 실험 결과 모두 이론 결과값과 상당한 차이를 보이고 있으며, 직경이 3mm의 관에서 그 차이가 더 크게 나타난다.

4.2 관의 직경

직경이 관내 유동에 미치는 영향을 파악하기 위해 초기 압력비와 격막 조건을 동일하게 설정하고, 직경이 3mm와 6mm인 두 개의 micro shock tube를 사용하여 Table 2의 조건과 같이 실험을 수행하였다.

실험으로부터 얻어진 결과를 Fig. 6에 x-t선도로 나타냈다. 관내 충격파는 Case(a)에 비해 Case(b)에서 더 빠르게 전파되며, 두 Case의 결과 모두 점성이 고려되지 않은 이론해석 결과와 상당한 차이를 보인다. 이것은 두 개의 micro shock tube 모두 점성에 의한 마찰, 즉 경계층 효과의

Table 3 Diaphragms used for the study (D=6mm).

Case	Materials	Number of diaphragm	Initial pressure ratio(P_4/P_1)
(a)	Cellophane	1	7.2
(b)	PP	1	7.2
(c)	Cellophane	3	7.2

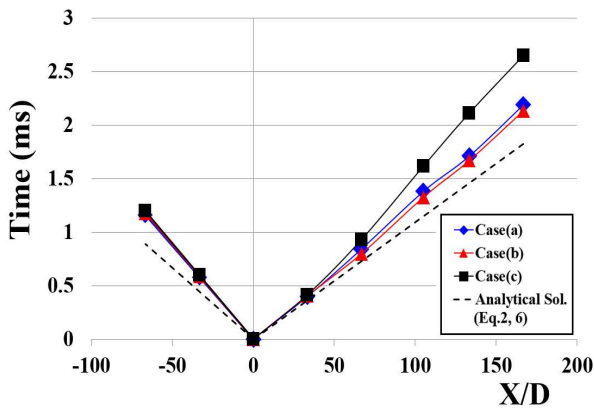


Fig. 8 Shock locations along axis for different diaphragm conditions

영향을 크게 받고 있음을 의미하며, 직경이 작을 수록 그 영향이 커짐을 확인할 수 있다. 이 결과에서도 고압관으로 향하는 팽창파 전파는 유사하게 나타나는데, 그 이유는 실험에서 사용된 두 개의 고압관 직경이 10mm로 같기 때문이라 판단된다.

충격파 감쇠를 나타낸 Fig. 7의 결과를 보면 Case(b)에 비해 Case(a)에서의 충격파 감쇠가 현저하게 나타나고 있으며, 이 또한 이론 해석 결과와 상당한 차이가 발생된다. 이 결과로부터 관의 직경이 관내에서 발생하는 충격파 전파에 상당한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

4.3 격막 조건

격막 조건의 변화에 따른 유동특성을 조사하기 위해 초기 압력비와 직경을 동일하게 설정하고 격막 조건을 세 가지 Case로 변화 시켜 실험을 수행하였으며, 그 조건을 Table 3에 나타냈다.

Fig. 8의 x-t선도를 보면, Case(a)에서 가장 빠른 충격파 전파속도가 발생되고, 상대적으로 두꺼운 격막조건인 Case(c)에서 가장 느린 충격파 전파속도가 발생되었다. 그리고 고압관을 향해 전파되는 팽창파의 결과도 같은 경향의 결과가 나타나

다. 이러한 차이는 참고문헌⁽¹⁰⁾에서와 같이 격막 재질의 성질이나 조건에 따라 달라지는 파막 과정의 차이로 인해 생성되는 충격파 강도가 변하게 되고, 이에 따라 각각 상이한 결과가 나타나는 것으로 판단된다. 그리고 이 결과에서도 실험 결과와 이론해석 결과 간의 차이가 발생했으며, 그 이유는 전술한 바와 같이 점성 마찰에 의한 것이라 판단된다.

5. 결론

Micro shock tube 관내를 전파하는 비정상파 거동을 실험적으로 조사하기 위하여 파막 실험을 수행하였다. 그들 결과로부터 충격파 전파에 영향을 미치는 초기 압력비 및 관의 직경 그리고 격막조건 등 세 가지 인자의 영향을 비교 분석하였다.

동일한 파막 조건에서 초기 압력비를 변화시킬 경우, 초기 압력비의 증가에 따라 관내에서 발생하는 충격파 강도는 크게 나타난다. 이에 따라 전파속도는 빨라지게 되며, 그 결과는 관의 직경이 6mm일 때 보다 3mm일 때 더 작게 나타난다.

동일한 초기 압력비 일 경우, 3mm직경의 micro shock tube에서 비교적 작은 충격파 강도가 나타났으나, 충격파 감쇠는 더 크게 발생한다.

격막 조건의 변화에 따라 발생하는 유동 특성은 달라졌으며, 가장 두꺼운 조건의 case에서 가장 느린 충격파가 발생했다.

후기

본 연구는 교육과학기술부 한국연구재단(NRF)의 사업인 중견연구자 지원 사업(과제번호: 2011-0017506)의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사 드립니다.

참고문헌
(References)

- (1) Park, J.O., Kim, G.Y. and Kim, H.D., 2013, "Experimental Study of the Shock Wave Dynamics in Micro Shock Tube," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 5, pp. 54-59.
- (2) Mirshekari, G. and Brouillette, M., 2009, "One-Dimensional Model for Microscale Shock Tube Flow," *Shock Waves*, Vol. 19, pp. 25-38.
- (3) Kim, H.D., 1994, "Shock Wave Phenomena in

- Fluid Engineerings(I)," Trans. of the KSME, Vol. 169, pp. 961~976.
- (4) Rajesh, G., Kim, H.D., Setoguchi, T. and Raghunathan, S., 2007, "Performance Analysis and Enhancement of the Ballistic Range," *Journal of Aerospace Science*, Part G, Vol. 221, pp. 649~659.
- (5) Arun, K.R. and Kim, H.D., 2012, "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.
- (6) Arun, K.R. and Kim, H.D., 2004, "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.
- (7) Liepmann, H. W. and Roshko, A., 2001, "Elements of Gasdynamics," Dover Books on Engineering.
- (8) Xiao, H., Toshiyuki, A. and Naoya, T., 2012, "The Feature of Weak Shock Wave Propagated in a Overlong Tunnel," *Open Journal of Fluid Dynamics*, Vol. 2, No. 4A, pp. 285~289.
- (9) Harold, M., 1957, " Attenuation in a Shock Tube due to Unsteady-Boundary Layer Action," National Advisory Committee for Aeronautics Report 1993, pp. 1~19.
- (10) Arun, K.R., Kim, H.D. and Setoguchi, T., 2012, "Computational Study on Micro Shock Tube Flows with Gradual Diaphragm Rupture Process," *Open Journal of Fluid Dynamics*, Vol. 2, No. 4A, pp. 235~241.