

상류막 방식과 하류막 방식의 Ludwig Tube에서 발생하는 유동특성에 관한 연구

신춘식* · 김희동**

A Study on the Flow Characteristics in the Upstream- and Downstream-Diaphragm Ludwig Tubes

Choon Sik Shin* · Heuy Dong Kim**

ABSTRACT

Among the many different types of wind tunnels, Ludwig Tube(LT) is the most suitable facility for high Reynolds number testing. Depending on the location of diaphragm, there are two types of LTs. In the present study, a computational work has been carried out to compare the operation characteristics of upstream- and downstream-diaphragm LTs. Two-dimensional, axisymmetric, unsteady, compressible Navier-Stokes equations were solved using a fully implicit finite volume scheme. Based on the present results, the flow mechanism of the starting process was discussed in detail using wave diagrams and characteristics of starting time and working time were investigated.

초 록

여러 형태의 풍동장치 중에서 Ludwig Tube(LT)는 높은 레이놀즈수 유동을 실현할 수 있는 가장 적합한 장치로 알려져 있다. 일반적으로 LT는 격막의 위치에 따라 두 종류로 구분된다. 본 연구에서는 상류막 방식과 하류막 방식 LT의 작동특성을 조사하기 위하여, 수치해석적인 방법을 적용하였다. 수치해석에서는 2차원 축대칭, 비정상, 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하였다. 그 결과, 본 수치해석은 시동과정의 유동 메커니즘을 파동선도를 이용하여 상세하게 설명하였으며, 시동 시간과 작동시간의 특성을 조사하였다.

Key Words: Compressible Flow(압축성 유동), Ludwig Tube(루드빅 튜브), Shock Wave(충격파), Supersonic Flow(초음속 유동), Unsteady Flow(비정상 유동)

1. 서 론

일반적으로 실험실에서 고속흐름을 실현하고 충격파 현상을 시험하는 데에는 천음속 혹은 초음속 풍동이 사용된다. 대개 이러한 풍동들은 가동 및 유지 보수에 상당한 경비를 필요로 하기 때문에 고속기류나 충격파 현상의 시험에는 경

계적이지 못한 단점이 있다. 현재 항공기, 추진 로켓 등의 고속화 및 대형화에 수반하여 보다 높은 마하수와 보다 높은 레이놀즈수의 유동을 실현할 수 있는 풍동이 절실히 요구되고 있다. 비교적 고마하수(High Mach number)의 유동은 충격파관(Shock tube)을 이용하여 실현될 수 있으나, 고레이놀즈수(High Reynolds number)의 유동을 얻기 위해서는 충격파관은 적당하지 않은 것으로 대부분 인식되어 왔다.

Ludwig tube(LT)는 충격파관을 이용하여 고

* 안동대학교 기계공학과 대학원

** 안동대학교 기계공학과

연락처, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

레이놀즈수의 유동을 얻기 위한 장치로 1955년 Ludwig[1]에 의하여 처음 개발되었다. LT의 구조는 일반적인 충격파관과 유사하지만, 측정부 상류에 설치한 노즐에 의하여 가속되는 기체를 사용하게 되므로, 초음속 Blow down 풍동의 저기조(Reservoir chamber)와 정체실(Plenum chamber) 대신에 매우 긴 저기관(Reservoir tube)을 가지는 특수한 형태의 풍동이라고 할 수 있으며, 유동의 Turbulence 레벨이 매우 낮고 고레이놀즈수 유동이 얻어지는 시험장치로 최근 각국에서 활발하게 연구되고 있다[2].

LT는 Fig. 1과 같이 격막(또는 급속개구 밸브)을 노즐의 상류에 설치하는 상류막 방식 LT(UDLT)와 Fig. 2와 같이 측정부의 하류에 격막을 설치하는 하류막 방식 LT(DDLTL)가 있다[3]. Fig. 1과 2에 나타난 바와 같이 저기관내에 고압공기를 충전하고 격막의 하류쪽을 진공으로 한 후, 격막을 파괴하면 하류쪽으로 충격파(Shock wave)와 접촉면(Contact surface)이 전파하고, 상류쪽으로는 비정상 팽창파(Expansion wave)가 전파하게 된다. 이러한 파동에 의하여 영역 ③의 유동이 발생한다. 이 유동은 노즐에 의하여 소정의 마하수를 가지는 초음속 유동으

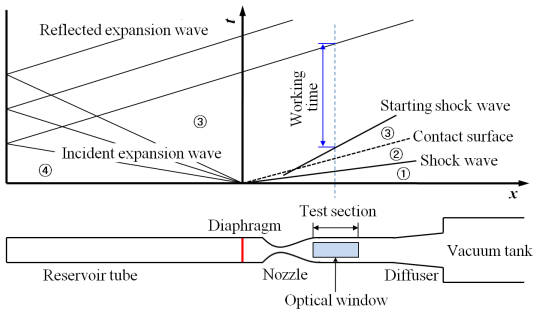


Fig. 1 Typical upstream diaphragm Ludwig tube (UDLT) and wave diagram

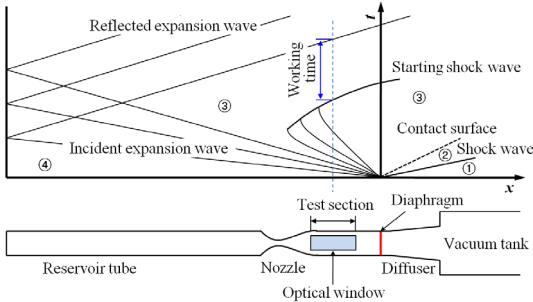


Fig. 2 Typical downstream diaphragm Ludwig tube (DDLTL) and wave diagram

로 가속되어 측정부에는 균일한 유동이 얻어진다. LT는 구조가 매우 간단할 뿐만 아니라 비교적 난류성이 낮은 고마하수와 고레이놀즈수의 유동이 실현될 수 있다.

본 연구에서는 LT의 성능에 관한 연구의 일환으로, UDLT와 DDLTL에 대하여 수치해석법을 이용하여 LT의 시동과정에서 발생하는 유동특성을 조사하고 비교하였다.

2. 수치해석법

본 연구에서는 LT의 시동과정에서 발생하는 기체유동의 특성을 조사하기 위하여, 축대칭 2차원 압축성 Navier-Stokes식을 이용하여 수치해석을 수행하였다. Fluent 6.3을 사용하였고, 선형연구조 수치해에 미치는 격자의존성을 조사하였으며, 또 여러 난류모델을 적용하여 유용한 실험결과와 비교하였다. 그 결과 후술하는 바와 같은 계산영역과 계산 격자를 얻을 수 있었으며, 압축성을 고려한 k- ω SST 난류모델이 가장 잘 실험결과를 예측하는 것으로 판단되었다.

2.1 Ludwig tube 형상

Fig. 3에서는 본 연구에서 적용된 LT의 형상을 도식적으로 나타내었다. 노즐목의 직경은 10 mm, 노즐 출구의 직경은 40 mm로 고정하였고, 저기관의 직경은 60 mm, 길이는 8,000 mm, 그리고 LT의 전체 길이는 10,255 mm로 고정하였다. 격막은 방식에 따라 노즐의 상류와 하류에 각각 지정하였다. LT는 격막 사이에 두고 영역 ④와 영역 ①로 구분되며, LT의 작동특성을 정량화하기 위하여 그림에 표시한 바와 같이 각 지점에 측정점 T와 S₁~S₄를 설치하였다.

2.2 계산영역 및 경계조건

Fig. 4는 본 수치계산에서 사용된 계산영역과 경계조건을 나타낸다. 격자의존성의 연구결과 수치계산에 사용된 격자는 대략 80,000개 이었다.

수치계산의 경계조건으로 디퓨저(Diffuser)의 출구에 Pressure outlet을 적용하였으며, 벽면에는 단일 No-slip조건을 적용하였다. 본 연구에서는 노즐의 배압(P₁)에 해당하는 Pressure outlet을 5.88×10³ Pa로 고정하고, 전온도는 293.15 K로 일정하게 유지하였다. 그리고 영역 ④의 공기 압력(P₄)을 고압으로 설정하여, LT의 압력비인 p₄₁의 값을 30~70 사이에서 변화시켰다. 또한,

Fig. 5와 같이 다양한 time step을 주어 실험결과[4]와 비교하였고, 최적의 time step을 찾아 수치해석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 6은 UDLT에서 p_{41} 을 변화시킨 경우, S_1 지점에서 측정된 압력변화를 나타낸다. 전술하는 바와 같이 격막이 파괴되어 하류로 전파하는 팽창파에 의해 압력은 증가하고, 이후 저기관의 끝단에서 반사되어 돌아오는 팽창파에 의해 압력은 감소한다. 여기서 b-c구간이 UDLT의 작동시간이 된다. Fig. 6에서 p_{41} 의 값이 증가하면 b-c구간의 압력값은 증가하고, 반대로 p_{41} 값이 감소

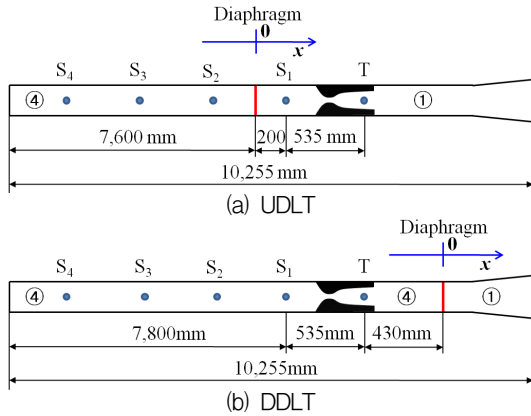


Fig. 3 Ludwig tube configurations

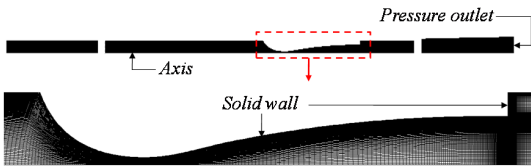


Fig. 4 Computational grid and boundary conditions

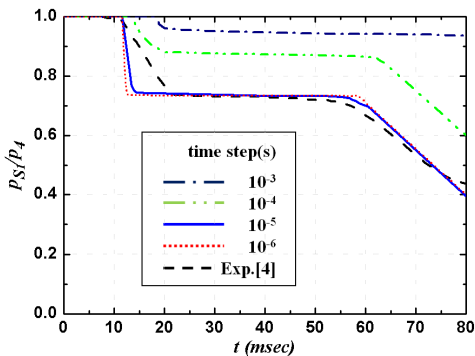


Fig. 5 Predicted pressure history at measuring point S_1 of DDLT

하면 b-c구간의 압력값은 감소한다. 이는 압력비에 따른 압축파의 강도에 기인한다.

Fig. 7은 DDLT에서 p_{41} 을 변화시킨 경우, S_1 지점에서 측정된 압력변화를 나타낸다. UDLT와는 다르게 격막이 파괴되어 상류로 전파하는 팽창파에 의해 압력은 감소하고, 이후 저기관의 끝단에서 반사되어 돌아오는 팽창파에 의해 압력은 다시 감소한다. Fig. 7에서 p_{41} 의 값이 증가하면 b-c구간의 압력값은 감소하고, 반대로 p_{41} 값이 감소하면 b-c구간의 압력값은 증가한다. 이는 압력비에 따른 팽창파의 강도에 기인한다.

Fig. 8과 9는 UDLT와 DDLT의 측정점 T와 $S_1 \sim S_4$ 에서 얻어진 수치해석의 결과를 바탕으로 작성한 파동선도(Wave diagram)이다. 그림으로부터 격막이 위치한 $x=0$ 지점에서 격막이 파괴되어 상류로 전파하는 비정상 팽창파가 발생한다. Fig. 8과 9에서 나타낸 바와 같이 노즐목의 하류에서 시동충격파(Starting shock wave)가 형성되어 하류로 이동하는데, 이는 노즐목에서 유동이 초크(Choke)하여 초음속 유동이 발생하기 때문이다.

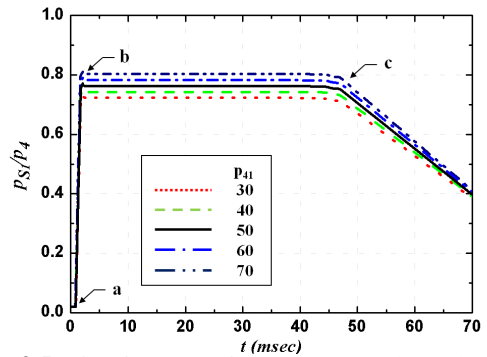


Fig. 6 Predicted pressure history at measuring point S_1 of UDLT

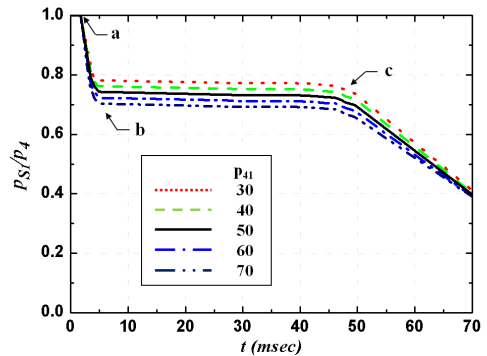


Fig. 7 Predicted pressure history at measuring point S_1 of DDLT

Fig. 10은 압력비가 변화했을 때, S_1 지점에서 UDLT와 DDLT의 시동시간(t_s)과 작동시간(t_w)이다. 그림에서 압력비가 증가할수록 시동시간은 길어지지만, 작동시간은 압력비가 증가할수록 감소한다. 이는 전술하는 파동선도에서도 확인할 수 있듯이, 시동시간이 감소하는만큼 작동시간은 증가하기 때

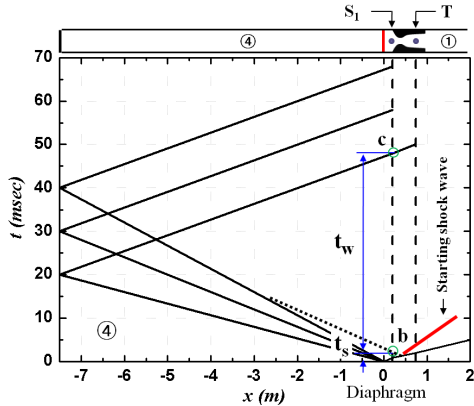


Fig. 8 Wave diagram of the starting process based on the computational results of UDLT ($p_{41}=50$)

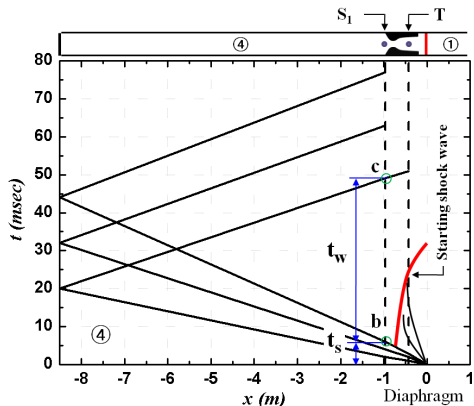


Fig. 9 Wave diagram of the starting process based on the computational results of DDLT ($p_{41}=50$)

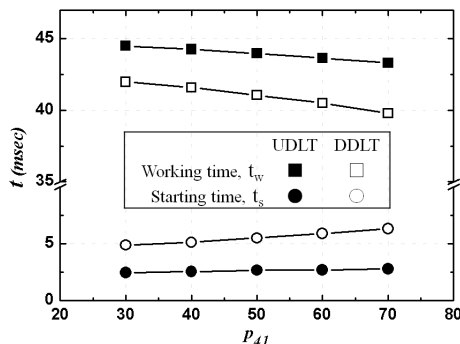


Fig. 10 Comparison of the working time(t_w) and the starting time(t_s) at measuring point S_1 of both LTs

문이다. UDLT가 DDLT에 비해 작동시간이 길고, 시동시간은 더 짧다.

본 연구에서는 수치해석법을 이용하여 LT 작동특성을 재현하였다. 향후, LT의 유한 파막 효과를 고려하여 수치해석을 수행 할 예정이며, 실험실에서 보유하고 있는 대형 LT를 이용한 실험적 결과와 비교 할 예정이다. 이러한 기초연구에 이어, LT의 작동시간을 연장하는 기술적 방법을 연구하고자 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 LT의 시동과정에서 발생하는 유동특성을 알아보기 위하여 축대칭 2차원 Navier-Stokes식을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

본 수치계산의 결과, LT의 압력비가 50인 경우, UDLT와 DDLT에서 격막이 파괴되면서 각각 상류와 하류로 전파하는 팽창파와 압축파가 발생하고, 축정부에서 압력이 일정한 균일유동이 형성된다는 것을 알았다. 이후, 균일유동은 저기관의 끝단에서 반사되어 돌아오는 비정상 팽창파가 축정부에 도달하는 순간까지 지속되었다.

UDLT가 DDLT에 비하여 시동시간이 짧고, 작동시간은 길었다. 작동시간만 보면 UDLT가 좋다고 할 수 있지만, 각각의 방식에는 장단점이 있으므로 이를 고려하여야 한다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(과제번호: 2009-0087898).

참 고 문 헌

1. Ludwig, H., "Der Rohrwindkannal," Zeit Flugwiss, Vol.3, No.7, 1955.
2. Schneider, S. P., Haven, C. E., "Quiet-Flow Ludwig Tube for High-Speed Transition Research," AIAA Journal, Vol.33, No.4, 1995, pp.688~693.
3. Kim, H. D., "Shock Wave Phenomenon in Fluid Engineering," Journal of KSME, Vol.35, No.1, 1995, pp.71~83.
4. Matsuo, K., Kawagoe, S. and Ogawara, T., "Starting Process of a Supersonic Ludwig Tube with a Downstream Valve," Bulletin of the JSME, Vol.21, No.161, 1978, pp.1610~1617.