

研究論文

2단 경가스총에 대한 실험적 연구

이중근* · 김희동**† · 구자예***

Experimental Study on a Two-Stage Light-Gas Gun

Jung Keun Lee* · Heuy Dong Kim**† · Ja Ye Koo***

ABSTRACT

Light gas guns have a large number of applications in various fields of engineering. A two-stage light-gas gun can produce an extremely high pressure in a very short interval of time. In general, the two-stage light-gas gun is made up of a high pressure tube, a compression tube and a launch tube, each stage being separated by diaphragms. This can be employed efficiently in the application of ultra-high pressure liquid jets. In the present study, experiments are carried out to investigate the projectile velocity and pressure behavior in the tubes according to the pressure changes at the first diaphragm opening. In the present study result was found that the rupture pressure of the first diaphragm has a dominant influence on piston acceleration.

초 록

Two-stage light-gas gun은 짧은 시간동안 초고압을 발생시키기 용이하므로, 현재까지 고속충격역학, 발사체 공기역학, 재료역학 등 다양한 공학 분야에서 활용되어 왔다. 일반적으로 2단식 경가스총은 고압실, 압축실 그리고 발사관으로 비교적 간단한 구조로 구성되며, 각 부분은 격막에 의해 구분되어있다. 본 연구는 2단식 경가스총을 초고압 액체 제트 분사에 적용하기 위한 기초적 연구로서, 고압실 하류에 설치된 제1격막의 파막 압력의 변화에 따른 발사체의 속도 변화 및 관내 압력 거동을 조사하였다. 그 결과, 제1격막이 파막 되는 압력은 피스톤의 가속에 큰 영향을 미치며, 피스톤이 가속될수록 고압을 생성하는데 용이하였다.

Key Words: Two-Stage Light-Gas Gun(2단식 경가스총), Projectile(발사체), Launch Tube(발사관), Projectile Aerodynamics(발사체 공기역학), Shock Wave(충격파)

1. 서 론

접수일 2010. 7. 9, 수정완료일 2010. 8. 9, 게재확정일 2010. 8. 14

* 학생회원, 안동대학교 대학원 기계공학과

** 종신회원, 안동대학교 기계공학과

*** 종신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

2단식 경가스총(일명 Ballistic Range라고도 함)은 고압실, 압축실 그리고 발사관으로 구성된 비교적 간단한 구조로 수 ms의 극히 짧은 시간동안 초

고압을 발생시키기 용이하여, 현재까지 고속충격 역학, 발사체 공기역학, 재료역학 등 다양한 공학 분야에서 활용되어 왔다[1].

최근에는 2단식 경가스총을 사용하여 초고압 상태에서의 유체유동의 열/유체역학적 특성에 관하여 세계적으로 많은 연구가 수행되고 있다 [2, 3].

본 연구에서는 2단 경가스총을 활용하여 초고압의 상태를 실현하고, 이를 이용하여 현재까지 충분히 연구되어 있지 않은 초음속 및 극초음속 연료제트의 전파특성 및 충격파와 액적 미립화의 관계등을 규명하는 연구를 수행하고자 한다. 이러한 연구의 일환으로, 본 연구에서는 2단 경가스총의 작동특성 및 성능과 2단 경가스총의 설계에 관한 자료를 얻기 위하여 기초적인 실험적 연구를 수행 하였다.

2단식 경가스총에 관한 연구는 미국, 호주, 일본 등 세계 각국에서 70년대 초반부터 활발하게 연구되어, 2단식 경가스총의 작동특성 및 성능에 대한 많은 연구결과들이 축적되어 있지만[2, 3], 국내에서는 이에 관한 연구는 매우 미비한 실정이다.

국내에서 수행된 연구로는 소형 Ballistic Range를 활용하여 발사체의 공력현상에 관한 연구가 수행된 것에 불과하므로 2단식 경가스총의 작동특성 및 성능에 대한 기초 연구가 선행되어야 할 것이다.

국외에서 수행된 초음속 연료 제트와 관련된 연구결과들에 의하면, 최근 일본의 동북대학교 충격파 연구소와 도요타 등 몇몇 자동차 기술연구소의 연구진들에 의해 초고압 디젤 엔진개발에 Ballistic Range를 사용하여, 액체연료가 충전된 노즐의 배후에 발사체를 직접 충돌시켜 액체의 초고압상태를 얻는 기술적 방법을 연구하였다[4, 5].

이들 연구에서는 발사체를 직접 액체연료가 충전된 노즐의 배후에 충돌시켜 수만 기압의 압력을 용이하게 달성해낼 수 있었다. 이 실험으로부터 발사체가 노즐의 배후에 충돌하는 압력이 액체제트의 미립화에 큰 영향을 미치며, 분사된

액체제트가 초음속의 속도로 전파한다는 것을 액체제트의 쉘리덴 가시화 사진에 나타난 충격파로부터 알 수 있었다. 그러나 액체제트의 전방에 충격파가 발생한다는 것을 규명하였지만, 액체제트의 전방에서 발생하는 충격파가 액적 미립화에 미치는 영향들은 규명되지 않았으며, 초음속 액체제트가 실험실의 무한 공간으로 전파하는 이상적인 경우에 대한 실험을 수행하여, 실제 유한체적의 연소실에서 발생하는 충격파의 반사 등의 효과가 액적 미립화에 미치는 영향 및 분사된 액체 연료의 국소가열효과 등에 관해서는 조사하지 않았다[4, 5].

본 논문에서는 위와 같은 증장기적인 연구의 일환으로 2단식 경가스총에 대한 기초실험을 수행하여, 작동특성 및 얻어지는 피크 압력 특성 등을 조사하였다.

2. 실험방법

2단식 경가스총의 구조는 Fig. 1과 같이 비교적 간단한 구조로 구성되어 있다. 2단식 경가스총은 고압실과 압축실 그리고 발사관으로 구성되어 있으며, 고압관의 직경은 150 mm, 길이는 1200 mm이고, 압축관의 직경은 60 mm, 길이는 2300 mm이며, 발사관의 직경은 15 mm, 길이는 1000 mm이다.

고압실과 압축실 사이에는 제1격막이 그리고 압축실과 발사관 사이에는 제2격막이 설치되어 있다. 압축실의 상류 부분에는 압축실내의 정제된 공기를 압축시킬 수 있는 피스톤이 설치되어 있으며, 발사관에는 제2격막에서 150 mm 떨어

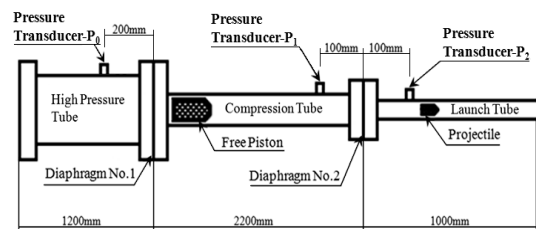


Fig. 1 Schematic of two-stage light-gas gun

진 위치에 발사체가 설치되어 있다.

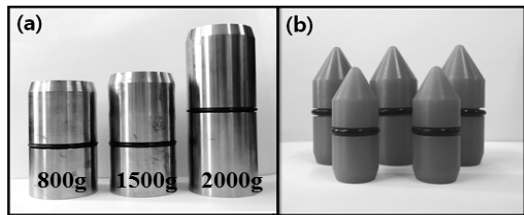
본 연구에서는 제1격막으로 3가지 종류의 필름을 사용하여 제1격막이 파막되는 압력을 변화시켰다. Table 1에 격막에 사용된 필름의 재질을 나타내었다. 피스톤과 발사체의 형상과 질량은 모든 실험에서 일정한 것을 사용하였다. 제2격막으로 필름을 한 장만 사용하여, 제1격막의 파막 압력(P_0)만을 변화시켰다.

Table 1. Condition of diaphragm

격막	제1격막	제2격막
재질 (OHP Film)	PP2900 FLP100 CG6000	FLP100



Fig. 2 Two-stage light-gas gun in ANU



(a) Piston (b) Projectile
Fig. 3 Free piston and projectile

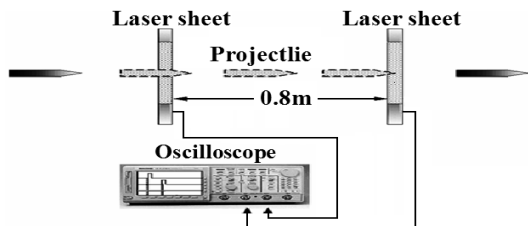


Fig. 4 Schematic of projectile velocity measurement system

참고로 Fig. 2는 본 실험에서 사용된 2단식 경가스총의 사진이다. 압축실의 상류에 위치한 피스톤은 Fig. 3(a)와 같이 스테인레스 강으로 제작되었으며, 실험에서는 질량이 820 g인 것을 사용하였다. 이 피스톤의 제원은 길이가 100 mm, 외경은 60 mm이다. 그리고 Fig. 3(b)의 발사체는 M.C Nylon 재질로 질량은 6 g이며, 길이는 37 mm, 외경은 15 mm이다. 발사관과 발사체의 기밀유지를 위하여 발사체의 외부에 고무링을 부착하였다.

2단 경가스총의 구동시 각 부분에서 압력변화를 측정하기 위해 2단식 경가스총의 각 위치에 압력센서(XT-190-1000A)를 설치하였다. 고압실에서 제1격막의 파막 전후의 압력변화를 측정하기 위한 센서는 Fig. 1에 도시한 바와 같이, 제1격막에 인접한 위치인 P_0 에 설치하였으며, 피스톤에 의해 발생하는 압력 변화 즉, 제2격막이 파막되는 전후의 압력변화를 측정하기 위해 압축실 P_1 의 위치에, 그리고 제2격막이 파막된 후 발사관에서 압력변화를 측정하기 위해 P_2 의 위치에 압력센서를 각각 설치하였다.

한편, 발사체의 비행속도 측정 방법은 Fig. 4에 도시한 바와 같이 2개의 레이저 센서와 오실로스코프를 사용하였다. 발사체의 속도를 측정하기 위한 첫 번째 레이저 센서는 발사관(Launch Tube)의 출구에서 0.2 m 떨어진 위치에 설치하고, 두 번째 레이저 센서는 첫 번째 레이저 센서와 0.8 m 간격으로 설치하였다.

속도는 발사체가 2개의 레이저 센서를 통과하는데 걸리는 시간을 오실로스코프로 측정하여 계산하였다. 발사체의 속도측정에서 발생하는 오차는 반복실험을 통하여 평가하였으며, 다른 정속 이송 물체를 이용하여 검정한 결과 $\pm 2.0\%$ 정도의 정확성을 유지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

결과에 사용된 그래프들은 절대압력을 사용하여 작성하였으며, P_0 와의 연관성을 파악하기 위

해 P_0 로 무차원화하였다.

Figure 5는 P_0 값의 변화에 따른 P_1 과 P_2 의 압력변화를 나타내고 있다. 여기에서 P_0 의 값은 각 조건에서 제1격막이 파막되는 압력, $P_{1, \max}$ 는 제2격막이 파막 되는 최고 압력, 그리고 $P_{2, \max}$ 는 제2격막이 파막된 후, 발사체에 작용하는 최고 압력이다.

제1격막이 파막 되어 고압실로부터 방출되는 고압의 공기가 압축실의 상류에 위치한 피스톤을 하류방향으로 가속시키게 되며, 가속된 피스톤은 압축실에 있는 정체된 공기를 단일 압축하여 제2격막을 파막시킨다. 제1격막이 파막하여 피스톤을 구동하게 되므로, P_1 에서 측정된 압력은 그림으로부터 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 그 후 제2격막이 파괴되면, 유동의 팽창으로

인하여 P_1 에서 압력은 급격하게 감소하며, 제2격막이 파막되는 순간 충격파가 발생하여 하류로 전파하게 되며, 발사체 후미부를 충돌하게 된다. 이로 인하여 발사체는 가속되며, 발사체 후미부에 충돌한 충격파의 일부는 상류로 다시 반사하여 $P_{1', \max}$ 의 피크 압력을 발생시키게 된다. 또한 P_0 가 높을수록 강한 충격파가 발생하여 $P_{1', \max}$ 이후 반복적으로 발생하는 충격파의 영향이 복잡하게 나타났다. P_2 에서 측정된 압력 값도 P_1 과 정성적으로 유사한 경향을 보이며, 피크 압력은 P_0 가 높고 낮음에 따라 차이를 보였다. 이 결과는 Fig. 6에 정리하였다.

한편 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 $P_{1, \max}$ 와 $P_{1', \max}$ 의 시간 간격은 ΔT_1 , 그리고 $P_{2, \max}$ 와 $P_{2', \max}$ 의 시간 간격을 ΔT_2 로 정의하여, Fig. 8에 요약하였다.

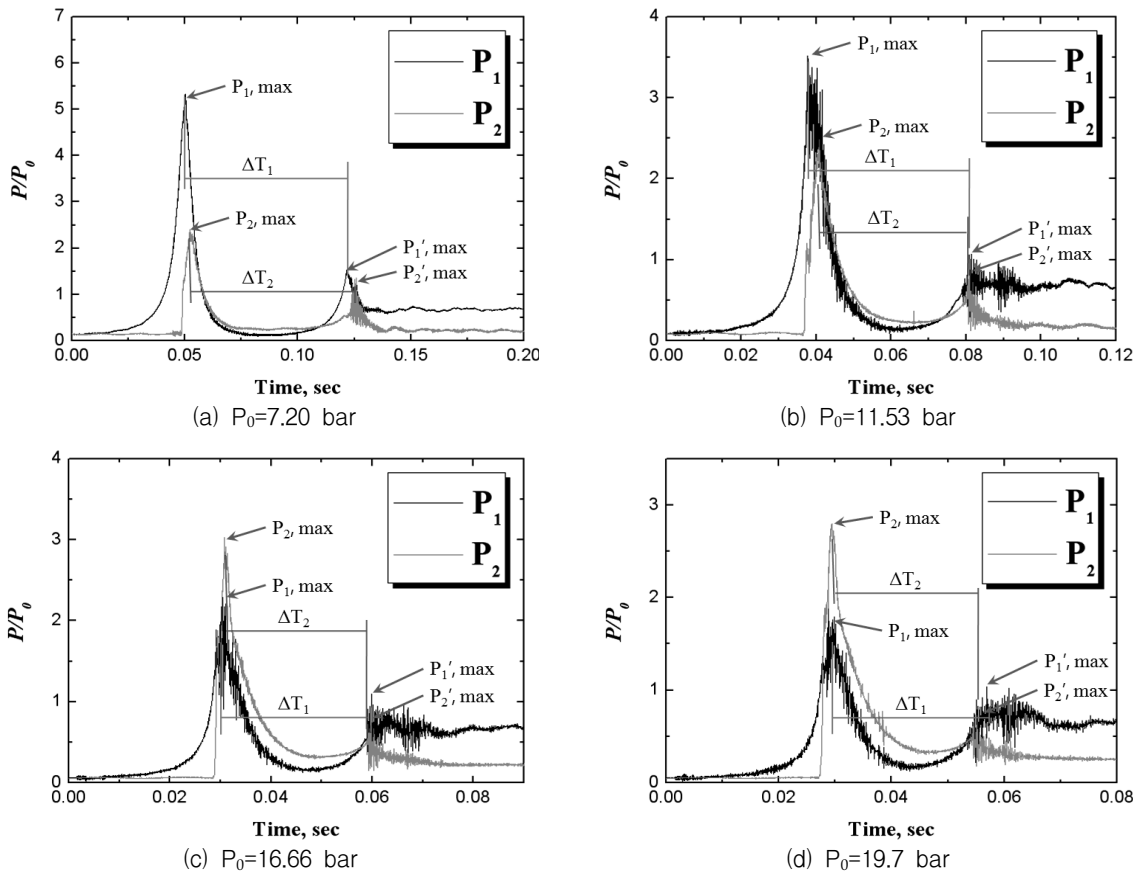


Fig. 5 Pressure-time curve

Figure 6은 제1격막의 파막압력(P_0)을 다양하게 변화시켜 측정한 $P_{1, \max}$ 와 $P_{2, \max}$ 값을 각각 P_0 로 무차원화 시켜 P_0 에 따른 $P_{1, \max}$ 와 $P_{2, \max}$ 의 경향성을 나타내었다. P_0 의 값이 14 bar 이하인 경우 $P_{2, \max}$ 값이 $P_{1, \max}$ 값보다 다소 낮게 측정되며, P_0 값이 15 bar 이상일 경우 $P_{2, \max}$ 값이 $P_{1, \max}$ 값보다 급격하게 증가한다.

이는 Fig. 5에서 제1격막이 파막된 후 제2격막이 파막 되기까지의 시간 간격은, P_0 가 7.2 bar인 경우 0.05 초, 11.53 bar인 경우 0.04 초, 16.66 bar인 경우 0.03 초 그리고 19.7 bar인 경우 0.025 초가 소요되었으므로, P_0 가 15 bar 이하에서는 고압실에서 방출된 공기의 압력이 압축실내의 피스톤을 가속시키는데 충분하지 않기 때문이며, 피스톤이 충분히 가속되지 않게 되면 P_1 의 압력이 서서히 증가하기 때문에 제2격막이 파막되는 순간 생성

되는 충격파의 강도가 약하기 때문이다.[3, 6].

또한, 그래프에서 P_0 에 따른 $P_{1, \max}$ 와 $P_{2, \max}$ 의 경향성을 살펴보면 $P_{1, \max}$ 값은 P_0 값의 증가와 무관하게 일정한 값을 가졌으며, $P_{2, \max}$ 값은 P_0 값이 증가함에 따라 상승하지만 약 18 bar 이후 증가 하지 않고 일정한 값을 나타내었다. 이는 P_0 가 높아짐에 따라 피스톤은 가속되지만 이번 실험에서 사용된 제2격막의 조건의 한계파막압력이 낮기 때문에 피스톤이 가속되는 도중에 제2격막이 파막 되었기 때문이다. 이 결과는 이번 실험에서는 결과를 포함시키지 않았지만 제2격막의 조건을 변화시킨 실험의 결과를 통해 알 수 있다.

Figure 7에는 P_0 가 발사체의 비행속도에 미치는 영향을 정리하였다. 발사체의 비행속도는 P_0 에 비례하여 증가하였으며, P_0 의 값이 9.5 bar 일

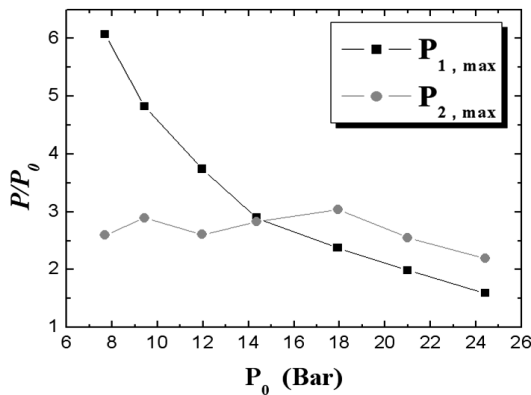


Fig. 6 $P_{1, \max}$ and $P_{2, \max}$ vs P_0

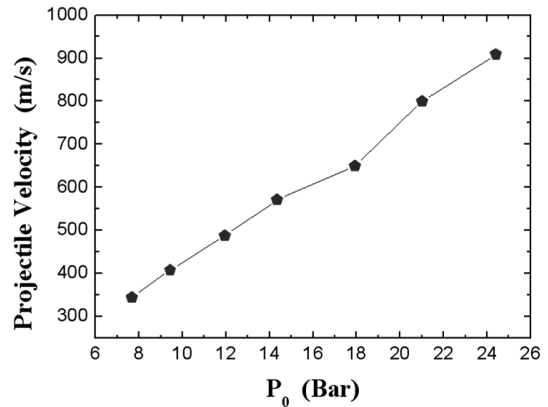


Fig. 7 Projectile velocity vs P_0

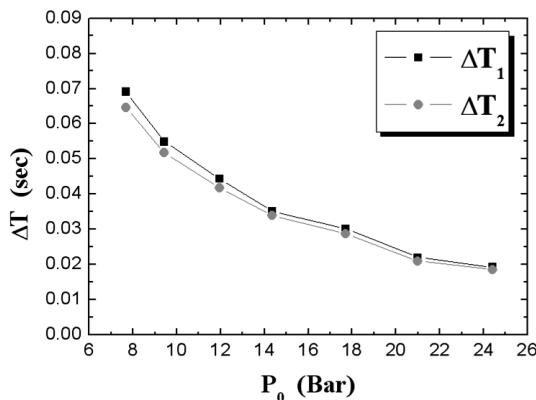


Fig. 8 Shock wave reflection time

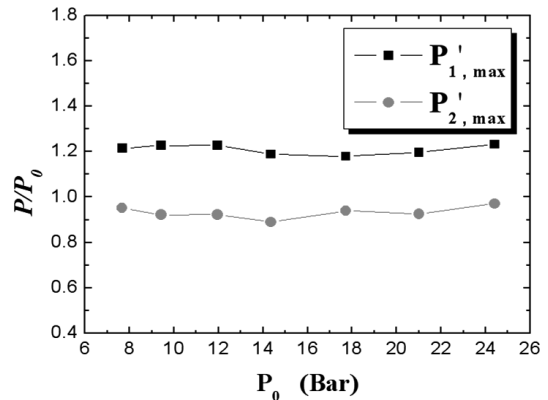


Fig. 9 Shock wave reflection vs P_0

때, 발사체는 음속에 도달하였으며, 17.48 bar 일 때, 발사체는 음속의 두배에 근접하였다.

Figure 8에는 Fig. 5의 $P_{1, \max}$ 와 $P'_{1, \max}$ 의 시간 간격은 ΔT_1 , 그리고 $P_{2, \max}$ 와 $P'_{2, \max}$ 의 시간 간격을 ΔT_2 로 정의하여 나타내었다. ΔT_1 과 ΔT_2 는 P_0 가 높을수록 강한 충격파가 생성되어 각 측정점의 위치로 충격파가 반사되어 되돌아오는 시간이 P_0 에 반비례하여 감소한다.

Figure 9에는 P_0 가 $P'_{1, \max}$ 와 $P'_{2, \max}$ 의 피크 압력 값에 미치는 영향을 정리하였다. $P'_{1, \max}$ 와 $P'_{2, \max}$ 는 P_0 에 대하여 일정한 값을 가진다.

4. 결 론

본 연구는 2단식 경가스총(Two-Stage Light-Gas Gun)을 활용하여 초고압을 생성 및 액체연료분사에 적용하기 위한 연구의 일환으로 2단식 경가스총의 구동 조건에 따른 작동특성을 파악하기 위해 수행되었다.

이번 연구에서는 제1격막의 파막 압력만을 변화시켜 2단식 경가스총의 작동 특성을 조사하였다. 실험의 결과는 다음과 같다.

1. P_0 는 2단 경가스총의 피스톤을 가속시키는 중요한 요인으로, P_0 가 높을수록 피스톤을 가속시킬 수 있어 발사관에서 고압을 생성하는데 용이하였다.
2. 발사체의 비행속도는 P_0 에 비례하여 증가하였으며, P_0 값이 9.5 bar 일 때, 발사체는 음속에 도달하였으며, 17.48 bar 일 때, 발사체는 음속의 두배에 근접하였다.
3. P_0 가 증가할수록 제2격막이 파막되는 순간

발생하는 충격파의 강도가 증가하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 사업인 일반연구자 지원사업(과제번호:2009-0087898)의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김희동, "유체공학에서 충격파현상(II)," 대한 기계학회지, 제35권, 제1호, 1995, pp.71-83
2. Lukaszewicz, J., "Constant Acceleration Flows and Applications to High-Speed Guns," AIAA Journal, Vol.5, No.11, 1967, pp.1955-1963
3. Stalker, R. J., "A Study of Free-Piston Shock Tunnel," AIAA Journal, Vol.5, No.12, 1967, pp.2160-2165
4. Nakahira, T., Komori, M., Nishida, N. and Tsujimura, K., "A Study of Shock Wave Generation around High Pressure Fuel Spray in Diesel Engine," Shock Waves Journal, Vol.2, 1991, pp.1271-1276
5. Shi, H.H. and Takayama, K., "Generation of Hypersonic Liquid Fuel Jets Accompanying Self-Combustion," Shock Waves Journal, Vol.9, 1999, pp.327-332
6. 강현구, Rajesh G., 이정민, 김희동 "Ballistic Range Simulator의 성능평가를 위한 실험적 연구," 한국추진공학회 제27회 추계학술대회 논문집, 2006, pp.367-370