

가는 관내에서의 데토네이션 전파에 관한 실험적 연구

이복직* · Joseph E. Shepherd** · 정인석*

Experiments on the Detonation Propagation in Small Tubes

Bok Jik Lee* · Joseph E. Shepherd** · In-Seuck Jeung*

ABSTRACT

The interest on the detonation in small tubes, which can be applied to the ignition devices of propulsion system, is increasing. However, the propagation dynamics of detonation waves in small tubes has not been investigated clearly yet. In the present experiments, propagations of detonation waves in stoichiometric propane-oxygen mixture through transparent tubes were recorded using a high speed camera and average velocities were measured as well. In terms of average velocity, there exists a transition regime where the waves show smooth transition from the normal Chapman-Jouguet(CJ) detonation to the low velocity detonation($\sim 0.5V_{CJ}$) along the decreasing initial pressure. In this transition regime, the detonation waves are highly unstable and show cyclic or intermittent longitudinal velocity fluctuation.

초 록

연소파를 이용한 로켓 점화장치 등에서의 응용으로 관내에서 전파되는 데토네이션에 대한 관심이 증대되고 있으나 그 특성에 관하여 알려진 바는 많지 않다. 본 실험적 연구에서는 프로판-산소 혼합기로 채워진 직경 5mm, 길이 30m의 투명한 관을 이용하여 데토네이션 파의 진행을 고속촬영을 통하여 가시화하였다. 평균 속도를 측정된 결과, 압력이 감소함에 따라 정상적인 Chapman-Jouguet(CJ) 모드에서 약 $0.5V_{CJ}$ 에 이르는 저속 모드로 평균 속도가 감소하는 천이 영역이 존재한다. 관 길이 전체에 걸쳐 데토네이션 전파의 동적 특성을 관찰한 결과, 천이 영역에서는 데토네이션이 매우 불안정하여 주기적이거나 간헐적인 속도의 출렁임이 발생한다.

Key Words: Chapman-Jouguet Detonation(CJ 데토네이션), Low Velocity Detonation(저속 데토네이션), Unstable Detonation(불안정 데토네이션)

1. 서 론

펄스 데토네이션 엔진(PDE)에서는 적은 에너지로 주기적인 데토네이션을 발생시킬 수 있는 데토네이션 발생기가 필요하며, 최근 Fig. 1과 같은 장치가 고안되고 실험적으로 그 작동 가능성이 연구되었다[1].

* 서울대학교 기계항공공학부 우주추진·연소실험실

** California Institute of Technology
연락처, E-mail: bok777@snu.ac.kr

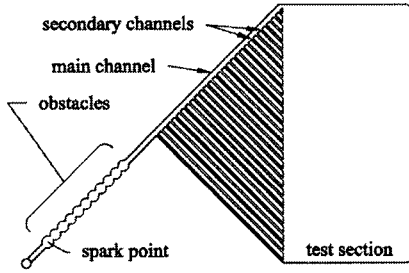


Fig. 1 Planar detonation initiator

이러한 데토네이션 발생기가 이상적으로 동작하기 위해서는 분기된 가는 관들을 통하여 전파되는 각각의 데토네이션의 전파 속도가 예측한 바와 정확하게 일치하여 최종적으로 관 끝에서 동시성을 확보하는 것이 관건이다. 또한 추진기관에 적용되는 연소파 점화 시스템[2]에서도 가는 관들을 이용하여 동시다발적으로 분포된 점화원을 얻고자 하는데, 역시 가는 관내에서의 데토네이션 전파 특성에 대한 이해가 필요하다. 이러한 가는 관내에서의 데토네이션 전파에 관한 연구는 러시아 연구진들에 의해 주로 실험적으로 전파 한계를 파악하는 목적으로 수행되었으며[3-6], 관 길이의 제약으로 인하여 그 동적 특성을 규명하는 데에 한계가 있었다. 한편, 데토네이션 셀 크기와 유사하거나 더 작은 크기의 직경을 갖는 가는 관은 기하학적 전파 한계 조건에 해당하며, 이러한 한계에 근접한 영역에서는 데토네이션이 매우 불안정한 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 초음파 도플러 간섭계 실험을 통하여 $23 \times 10 \text{ mm}^2$ 단면 및 30 m 길이[7], 38.4 mm 직경 및 10 m 길이[8], 45 mm 직경 및 14 m 길이[9], 38 mm 직경 및 24.5 m 길이[10] 등에 대한 데토네이션 전파 속도 측정이 이루어져 galloping, stuttering 등의 주기적 불안정 진행 모드가 관찰되었으나, 직경의 260~1,300배에 이르는 제한적인 길이로 인하여 주기적인 특성을 충분하게 규명하지 못하였으며, 상대적으로 큰 직경을 이용하여 마찰력과 열손실 등의 스케일 효과를 볼 수 없었다. 본 연구에서는 이러한 단점들을 보완하여 직경의 10,000배에 이르는 가늘고 긴 관을 이용하여 데토네이션 전파 속도를

구간별로 측정함과 동시에 고속촬영 및 이미지 처리를 통한 연속적인 속도 변화를 관찰하여 그 전파 특성을 규명하는 것을 목적으로 한다.

2. 본 론

2.1 실험 구성 및 방법

본 실험은 미국 California Institute of Technology의 Explosion Dynamics Laboratory에서 수행되었다. 사용된 데토네이션 실험 장치는 가스 공급부, 시험부, 제어부, 데이터 획득 시스템으로 이루어져 있으며, Fig. 2와 같다. 방전에너지 40 mJ의 점화 플러그를 이용한 내부 직경 0.5인치의 데토네이션 발생기를 이용하였고, 데토네이션 천이과정(DDT)을 거쳐 안정화되는 구간을 직경 5 mm, 길이 15 m의 구리관으로 하였으며, 측정부 M1과 M2 사이에 30 m, M2와 M3 사이에 5 m 길이의 내부 직경 4 mm 투명 폴리우레탄 튜브를 설치하였다.

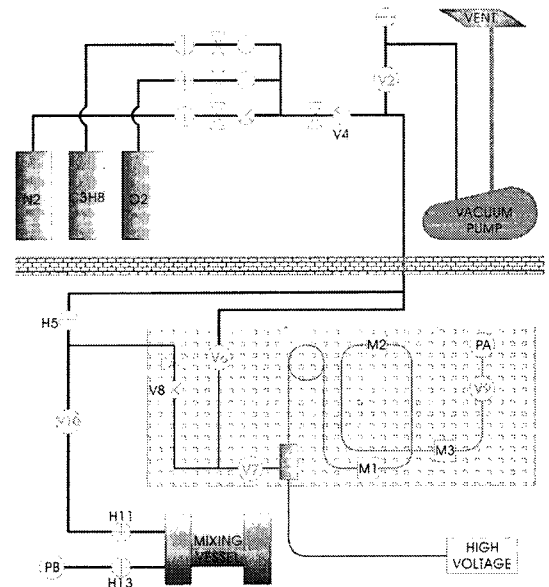


Fig. 2 Experimental Setup

각각의 측정부에서는 압력센서, 광센서, 이온센서를 중복 장착하여 데토네이션 전파 속도를 측

정하고 충격파와 화염면이 분리되는 경우를 포착할 수 있도록 하였다. M1과 M2 사이 구간에서는 Phantom V5 고속카메라를 이용하여 Fig. 3과 같이 폭 1m, 10라인으로 이루어진 붉은 점선의 영역을 지나는 데토네이션을 1024x64 픽셀의 해상도와 초당 15,000 프레임으로 촬영하고, 연속적인 추적을 위하여 24회전된 영역을 256x256 해상도, 초당 12,000 프레임으로 촬영하였다.

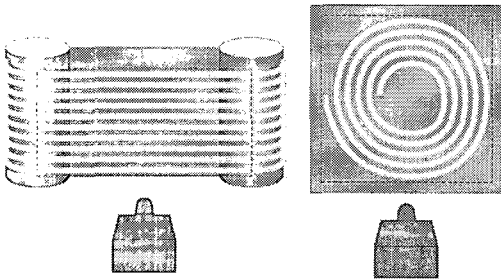


Fig. 3 Configurations of visualization with high speed camera

본 실험에는 stoichiometric propane-oxygen 혼합기를 사용하였고, 초기 압력을 100 kPa에서 데토네이션이 더 이상 전파되지 않는 한계 압력인 5 kPa 까지 변화시켜가며 데이터 획득 및 촬영을 동시에 실시하였다.

2.2 평균 속도 측정 분석

세 측정부에서 얻어지는 데이터는 압력 센서 신호, 이온 센서 신호, 광 센서 신호이며, 그 예로서 초기 압력 20 kPa에 대한 데이터를 Fig. 4에 제시하였다. TTL 신호를 포함하여 모두 10개의 데이터를 8 채널에서 얻을 수 있도록 이온 센서 데이터는 중첩하여 획득하였다. 각 신호로부터 충격파와 화염면이 결합되었음을 확인할 수 있으며, 이로부터 얻어지는 구간속도를 각각 V_{12} , V_{23} 라 하고 초기 압력의 변화에 따라 각 조건에서의 Chapman-Jouguet 데토네이션 속도 (V_{CJ})에 대한 비율로 나타내면 Fig. 5와 같다. 초기 압력 20kPa 이상에서는 V_{CJ} 에 근접한 속도로 진행하며, 10 ~ 15 kPa의 구간에서 천이과정을 거쳐 10 kPa 보다 낮은 압력에서는 $0.6V_{CJ}$ 이하의 저속 데토네이션으로 진행함을 할 수 있다.

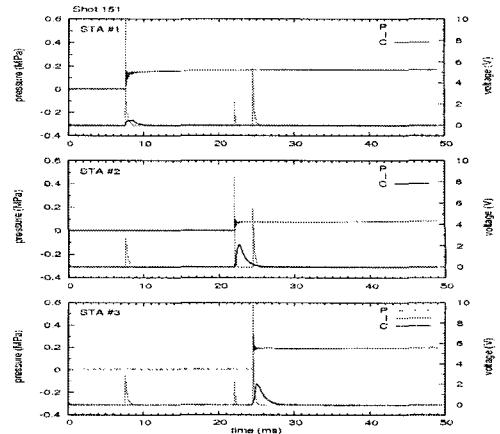


Fig. 4 Data at each station, P = 20 kPa

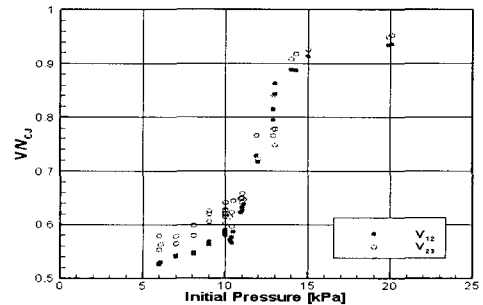


Fig. 5 Average propagation velocity as a function of initial pressure

2.3 가시화 실험 분석

고속 촬영된 이미지로부터 각 프레임의 데토네이션 위치를 MATLAB을 이용하여 추출하였고, 직선 구간 촬영에서 관찰된 불안정 진행의 예를 Fig. 6에 제시하였다. 느려졌다가 다시 정상 속도를 회복하는 현상이 관찰된다.

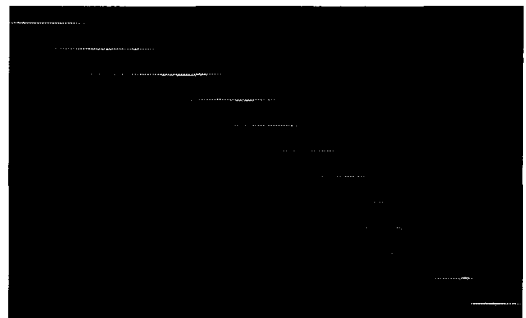


Fig. 6 Processed image of unstable propagation, P=13 kPa

경주 트랙 형태 배치에서 데토네이션 전파를 전 구간에서 걸쳐 연속 추적한 결과, 천이 구간 압력에서 두 가지 형태의 특징적인 진행 모드가 존재함을 확인하였다. 즉, Fig. 8에서와 같이 $0.3V_{CJ}$ 에서 $1.2V_{CJ}$ 속도 사이에서 주기성을 보이는 규칙적 불안정 모드와 Fig. 9에서처럼 유사한 불안정 구간이 간헐적으로 나타나는 모드가 존재한다. 전자의 경우는 꺾로핑 데토네이션으로 분류될 수 있으며, 후자의 경우는 CJ 데토네이션 모드에서 꺾로핑 데토네이션 모드로 변화하는 경계 단계, 즉 Fig. 5의 천이 구간의 시작 모드로 볼 수 있다.

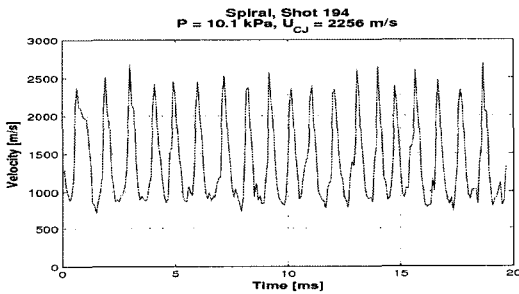


Fig. 7 꺾로핑 데토네이션 모드, $P = 10$ kPa

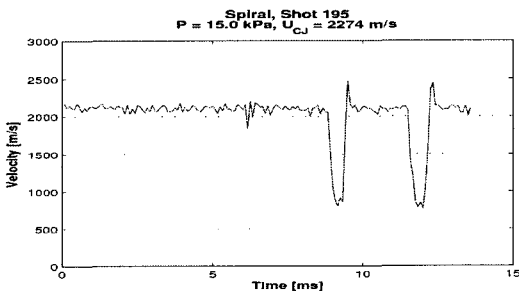


Fig. 8 간헐적 출렁임 모드, $P = 15$ kPa

3. 결 론

가는 관내에서 압력이 낮아질수록 점화 지연 시간이 길어져 데토네이션 진행 한계에 근접함에 따라 평균 속도가 V_{CJ} 에서 약 $0.5V_{CJ}$ 의 저속으로 천이하는 영역이 존재하며, 그 구간에서는 $0.3V_{CJ}$ - $1.2V_{CJ}$ 의 폭을 간헐적으로 출렁이거나 주

기적으로 출렁이는 불안정 전파 특성을 보인다.

후 기

본 연구는 과학재단의 국가지정연구실 사업(NRL, M10500000072-05J000007210)의 일환으로 수행되었으며, 제 1저자는 2005년도 BK21 장기 해외연수 지원과, Seoul Science Fellowship의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Choi, J.Y. and Yang, V., "Numerical study of detonation wave propagation in combustion wave ignition (CWI) system, AIAA 2003-5207
2. Jackson, S. J. and Shepherd, J. E., "Initiation systems for pulse detonation engines," AIAA 2002-3627
3. Vasil'ev, A. A., "Geometric limits of gas detonation propagation," *Combust. Explos. Shock Waves*, Vol. 18, No. 2, 1982, pp.245-249
4. Manzhalei, V. I., "Detonation regimes of gases in capillaries," *Combust. Explos. Shock Waves*, Vol. 28, No. 3, 1992, pp.296-302
5. Manzhalei, V. I., "Low-Velocity Detonation Limits of Gaseous Mixtures," *Combust. Explos. Shock Waves*, Vol. 35, No. 3, 1999, pp.296-302
6. Frolov, S. M. and Gel'fand, B. E., "Limit diameter of gas detonation propagation in tubes," *Combust. Explos. Shock Waves*, Vol. 27, No. 1, 1991, pp.113-117
7. Edwards, D.H., Hooper, G. and Morgan, J. M., "A study of unstable detonations using a microwave interferometer," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol 7., 1974, pp.242-248
8. Lee, J. J., Dupré, G., Knystautas, R. and

- Lee, J.H., "Doppler interferometry study of unstable detonations," *Shock Waves*, Vol. 5, No. 3, 1995, pp.175-181
9. Ishii, K. and Grönig, H., "Behavior of detonation waves at low pressures," *Shock Waves*, Vol. 8, No. 1, 1998, pp.55-61
10. Haloua, F. Brouillette, M., Lienhart V. and Dupré, G., "Characteristics of unstable detonations near extinction limits," *Combustion and Flame*, Vol. 122, No. 4, 2000, pp.422-438