

경사 데토네이션파의 근사 해석 모델과 비정상 상세구조

최정열* · 김동완**

Approximate Analysis Model and Detailed Unsteady Structure of Oblique Detonation Waves

Jeong-Yeol Choi* · Kim, Don-Wan**

ABSTRACT

By extending one-dimensional ZND detonation structure analysis model, a simple model for two-dimensional oblique detonation wave structure analysis is presented by coupling Rankine-Hugoniot relation and chemical kinetics for oblique shock wave and oblique detonation wave. Base on this study, two-dimensional fluid dynamics analysis is carried out to investigate the detailed unsteady structure of oblique detonation waves involving triple point, transverse waves and cellular structures. CFD results provide a deeper insight into the detailed structure of oblique detonation waves, and the simple model could be used as a unified design tool for hypersonic propulsion systems employing oblique detonation wave as combustion mechanism.

초 록

일차원 ZND 데토네이션 구조 해석 모델의 연장선상에서 경사 충격파와 경사 데토네이션 파에 대하여 Rankine-Hugoniot 관계식과 반응속도를 연계한 이차원 경사 데토네이션 파의 구조해석 모델을 제시하였다. 이에 기반을 두어 삼중점, 횡단 충격파 및 셀 구조를 포함하는 경사 데토네이션 파의 비정상 상세 구조를 조사하기 위한 이차원 유체역학 해석을 수행하였다. 전산 유체 해석 결과는 경사 데토네이션 파의 상세구조에 대한 깊이 있는 이해를 제공하며, 해석 모델은 경사 데토네이션 파를 연소 메커니즘으로 이용하는 극초음속 추진기관의 통합 설계도구로 이용될 수 있을 것이다.

Key Words: Oblique Detonation Wave, Rankine-Hugoniot relation, ZND (Zeldovich-von Neumann Döring) Structure, Detonation Cell Structure

1. 서 론

경사 데토네이션 파는 Chapmann-Jouguet (C-J) 데토네이션 속도보다 충분히 큰 속도에서 경사면에 부착된 형태로 안정화된 데토네이션 파로써, 극초음속 비행체 추진기관의 연소 체계를 염두에 두고 많은 연구가 이루어져 왔다. 경사 데토네이션 파를 극초음속 비행체 추진

* 부산대학교 항공우주공학과

** 부산대학교 대학원 항공우주공학과

연락처, E-mail: aerochoi@pusan.ac.kr

기관에서 이용하는 경우, 공기와의 혼합을 위하여 공기 흡입구에서 연료를 분사하며, 예혼합기가 연소기 전방의 경사 충격파에 의하여 점화되어 경사 데토네이션 파를 형성하며 이후 팽창과정을 거쳐 추진력을 발생시킨다. 이러한 방식의 추진기관을 경사 데토네이션 파 엔진 (ODWE)이라고 부르며, 연료 분사와 혼합이 비행체 외부에서 이루어지고 데토네이션 파 자체가 압축기와 연소기의 역할을 하므로, 연료와 공기의 혼합 및 연소와 화염의 안정화를 위하여 긴 연소기를 필요로 하는 일반적인 스크램제트 연소기에 비하여 매우 간단한 구조를 가진다.

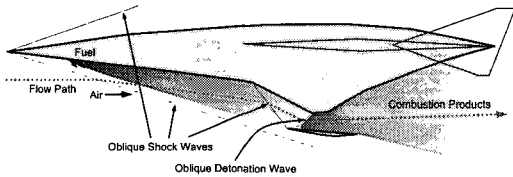


Fig. 1 Schematics of Hypersonic Vehicle with Oblique Detonation Wave Engine (ODWE)

최근 십여년간 경사 데토네이션 파를 이용하는 또다른 방식의 추진기관인 램속기에 대한 연구가 주목을 받으면서 많은 진전이 이루어 졌으나, 경사 데토네이션파 현상 자체가 일반적으로 쉽게 구현하기 어려운 고엔탈피의 가연성 혼합기체에서 발생하는 현상이므로, 알려진 역사에 비하여 깊이있는 연구가 이루어지지는 않은 상태이다. 본 연구에서는 Rankine-Hugoniot 관계식 및 ZND 해석 모델을 이용하여 경사 데토네이션 파의 정상 상태 구조를 계산하는 간단한 모델을 제시함과 더불어, 그동안 자세히 알려지지 않았던 경사 데토네이션 파의 파면 셀 구조를 전산유체 해석을 통하여 보이고자 한다.

2. 경사 데토네이션파의 정상상태 해석 모델

정상 상태 가정으로부터 경사 데토네이션 파를 기술할 수 있는 Rankine-Hugoniot 관계식은 파면에 수직인 속도 성분만을 고려하여 다음과 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} u &= u_n n + u_t t, \quad u_{1,t} = u_{2,t} \\ \rho_1 u_{1,n} &= \rho_2 u_{2,n} \\ \rho_1 u_{1,n}^2 + p_1 &= \rho_2 u_{2,n}^2 + p_2 \\ h_1 + \frac{1}{2} u_{1,n}^2 &= h_2 + \frac{1}{2} u_{2,n}^2 - q \end{aligned} \quad (1)$$

다음 Fig. 2 은 경사 충격파 및 데토네이션 파에 대하여 마하수와 격임각 및 파각의 관계를 도시한 예이다.

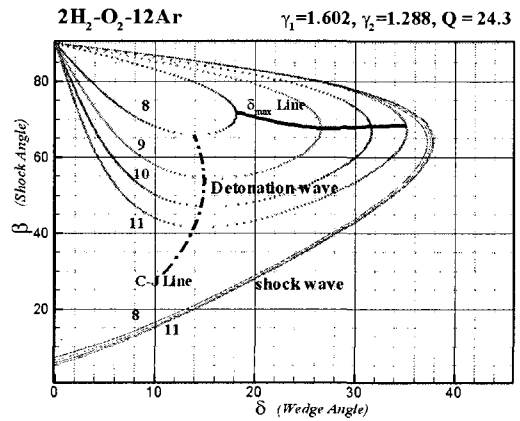


Fig. 2 Shock and Detonation Polar Diagram

Rankine-Hugoniot 관계식으로부터 얻어진 경사 충격파 및 데토네이션 파의 파각과 후방 유동 조건을 초기 조건으로 하여 반응 속도 식을 임의의 위치에 대한 Rankine-Hugoniot 관계식과 함께 공간 적분하면 경사 충격파 및 데토네이션 파 후방의 ZND 구조를 계산할 수 있으며, 이로부터 경사 데토네이션 파의 구조를 기하학적 구조를 얻을 수 있다. Fig. 3은 Fig. 2의 혼합기에서 마하수 10, 격임각 20° 인 경우의 경사 데토네이션 파의 구조를 Rankine-Hugoniot/ZND 해석의 결과로부터 결정된 그림이다. 본 해석의 결과는 경사 데토네이션 파의 구조를 파악하는 기본적인 자료로 이용할 수 있음은 물론 전산 유체해석에서 필요한 격자 크기를 결정하는 도구로 이용될 수 있다.

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = (1 - Z)k \exp\left(-\frac{E\rho}{p}\right) \quad (2)$$

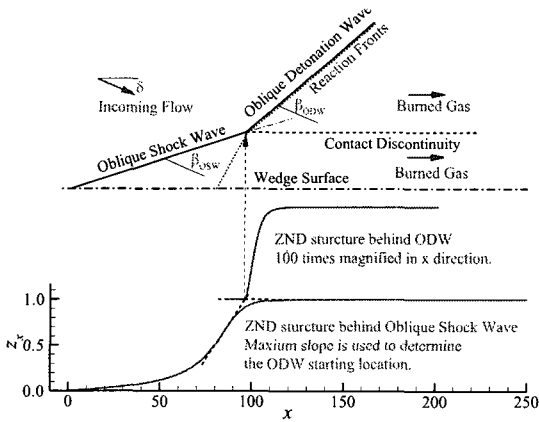


Fig. 3 Oblique detonation wave structure from Rankine-Hugoniot/ZND analysis

3. 전산 유체 해석 및 결과

경사 데토네이션 파의 해석을 위하여 Euler 방정식과 함께 반응 진행 변수를 도입한 1 단계 비가역 반응 모델을 이용하였으며, 연계된 지배 방정식은 벡터 형태로 식 (3) 과 같이 정리 할 수 있다. 압력은 상태 방정식으로부터 내부에너지와 발열량을 고려하여 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e \\ \rho Z \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho Hu \\ \rho Zu \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho Hv \\ \rho Zv \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$p = (\gamma - 1) \left[e - \frac{\rho}{2} (u^2 + v^2) + \rho Zq \right] \quad (4)$$

미연 혼합기와 연소 생성물은 서로 다른 열역학적 물성을 가지므로, Rankine-Hugoniot 관계식을 만족하는 비열비를 식 (5)과 같이 반응 진행 변수의 함수로 이용하였다.

$$\gamma(Z) = \frac{\gamma_U(\gamma_B - 1)(1 - Z) + \gamma_B(\gamma_U - 1)Z}{(\gamma_B - 1)(1 - Z) + (\gamma_U - 1)Z} \quad (5)$$

식 (3)에 연계된 보존형의 지배방정식은 유한 체적 기법에 기반 하여 이산화 되었다. 셀 경계면에서의 수치 플럭스는 RoeM2 근사 리만 해법과 MUSCL 외삽에 기

초한 3차의 TVD 해법을 공간 차분에 적용하였다. 시간 적분 기법으로는 4차의 정확도를 가지는 4단계 Runge-Kutta 해법을 사용하였다.

Fig. 4와 5는 마하수 7 이고 격각각 30° 인 유동 조건에서 반응 전후의 비열비 $\gamma = 1.3$ 으로 일정하고, 반응을 상수 $k=200$, 활성화 에너지 $E=30$ 인 조건의 해석 결과이다. 계산 격자는 1.0×0.4 의 계산 영역에 $2,007 \times 802$ 개의 계산 격자를 이용하였다. Fig.4 는 온도 분포와 압력 분포를 겹쳐서 그린 그림이며, Fig. 5는 반응 진행 변수와 압력 분포를 겹쳐서 그린 그림이다.

경사충격파 후방에서 점화 지연 거리를 가진 후, 발열과 팽창에 의하여 연소면과 경사 충격파의 상호 작용이 일어나면서 경사 데토네이션파가 형성됨을 알 수 있다. 삼중점의 위쪽 줄기에 형성된 경사 데토네이션 파는 유동 방향에 수직에 가까운 각도를 가지며, 충격파와 연소면이 강하게 연계되어 있으나, 후방으로 진행할수록 충격파와 연소 면이 분리되는 overdriven 된 충격파 유도 연소의 경향을 보인다.

상호 작용이 일어나는 삼중점에서는 횡단(transverse) 충격파가 발생하여 벽면에서 반사되며, 경사 충격파 후방의 유동과 경사 데토네이션 파 후방의 유동 사이에 접촉 불연속 면이 형성됨을 알 수 있다. 횡단 충격파 면 가운데, 삼중점에 가까운 부분은 점화 지연 거리를 충분히 가지지 못한 미연 가스 지역을 통과하면서 미연가스를 가열, 연소 시키는 또 다른 경사 데토네이션 파의 역할을 한다.

한편 벽면에서 반사된 경사 충격파는 접촉 불연속면과 상호작용 하여 유동의 불안정성을 유발하여 외동을 발생시킨다. 이와 같이 밀도구배가 있는 접촉 불연속면에 경사 충격파가 입사할 때 발생하는 유동의 불안정성은 Kelvin-Helmholtz instability 로 알려져 있다. 한편 여기서 발생한 외동은 압력 섭동을 가져와 후방의 유동을 복잡하게 만드는 요인이 된다.

접촉 불연속면을 통과한 경사 충격파는 더 큰 파각의 경사 충격파로 전이하여 경사 데토네이션 파면과 상호 작용하며 경사 충격파의 파면에 불안정성을 유발하는데, 불안정성의 근본적인 원인은 충격파와 연소 면에서 발생하는 밀도 구배와의 상호작용에 따르는 불안정성이 원인으로 보인다.

경사 데토네이션 파면에 발생한 불안정성은 삼중점을

교란하지는 못하고 하류로만 전파하는데, 이는 경사 충격파 후방의 유동이 국부적으로 이미 초음속 조건에 해당하기 때문이다. 후방으로 전파되는 불안정성은 중첩되어 최종적으로는 경사데토네이션 파면에 일반적인 self-sustained 데토네이션에서처럼 셀 구조를 보인다.

Fig. 4와 5의 그림에서 불안정하고 불규칙한 구조를 가지는 데토네이션 파면 구조를 확인 할 수 있으며, 압력 선도에서 셀 구조에 기인하는 횡단 충격파를 확인 할 수 있다. 그러나 경사 데토네이션 파의 불안정한 파면 구조는 음속 크기의 벽면 방향의 속도가 존재하는 조건이므로 일반적인 데토네이션 파면 구조와는 다소 다른 양상

은 보이는 것으로 보이며, 이는 정규 진동을 보이는 약한 불안정성의 경우에 대하여 현재보다 고해상도의 연구를 통하여 규명하여야 할 것으로 보인다.

4. 결 론

극초음속 항공우주 추진기관의 연소 메커니즘으로 이용될 수 있는 경사 데토네이션 파에 대한 이론적, 수치적 연구를 수행하여, 경사 데토네이션 파의 기본 구조를 계산 할 수 있는 Rankine-Hugoniot/ZND 해석 모델을 제시하였으며, 이는 추진기관의 설계 도구는 물론 경사 데

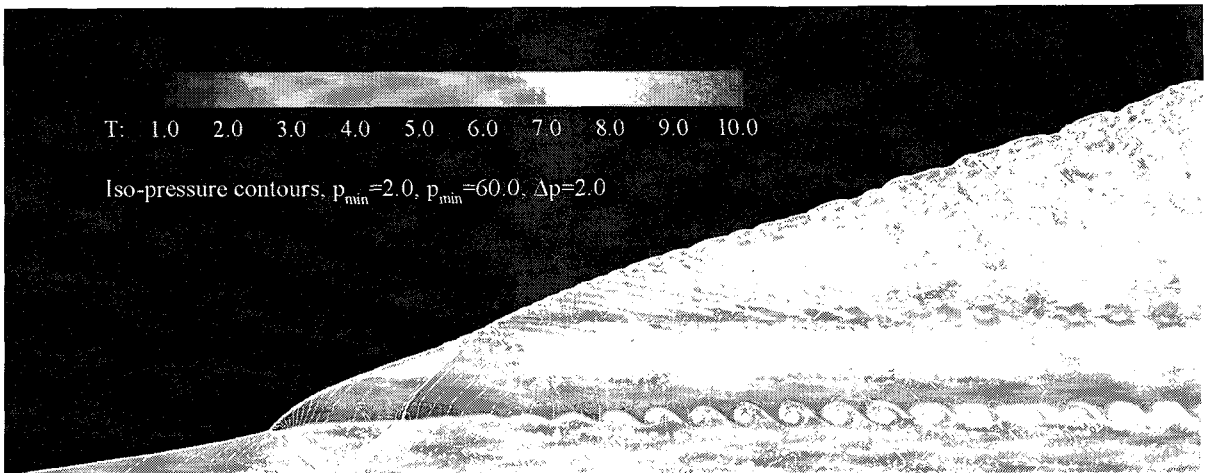


Fig. 4 Oblique detonation wave structure showing the mechanism of flow instabilities



Fig. 5 Unstable oblique detonation wave surface. Locally magnified plot of a region in Fig. 4.

토네이션 파의 전산 유체 해석에서 주어진 조건에서의 격자 해상도 설정을 위한 기초 연구 도구로 이용될 수 있을 것이다.

이를 바탕으로 한 경사 데토네이션 파의 고해상도 전산 유체 해석을 통하여 그 동안 많은 연구자들의 연구에서 보이지 않았던 경사 데토네이션 파의 불안정성을 포착하였으며, 해석 결과에 대한 분석을 바탕으로 충격파와 밀도구배 등의 상호 작용에 기인하는 불안정성의 유체역학적 거동 특징과 원인에 대하여 논의 및 규명하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 고에너지 물질 특화연구센터와 과학기술부 국가지정 연구실 사업의 지원을 받아 수행된 결과이며 연구비지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Pratt, D.T., Humphrey, J. W. and Glenn, D. E., "Morphology of Standing Oblique Detonation Wave," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 7, No. 5, Sept.-Oct. 1991, pp. 837-845.
- Shepherd, J., "Detonation Waves and Propulsion," *Combustion in High-Speed Flows*, Edited by Buckmaster, J., Jackson, T. L. and Kumar A., Kluwer Academic Pub., Dordrecht Netherlands, 1994, pp. 373-420.
- Sislian, J. P., Schirmer, H., Dubeout, R. and Schumacher, J., "Propulsive Performance of Hypersonic Oblique Detonation Wave and Shock-Induced Combustion Ramjets," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 17, No. 3, May-June, 2001 pp. 599-604.
- Li, C., Kailasanath, K. and Oran, E. S., "Detonation Structures Behind Oblique Shocks," *Physics of Fluids*, Vol. 6, No. 4, April 1994, pp.1600-1611.
- Dabora, E.K., Desbordes, D., Guerraud, C. and Wagner, H. G., "Oblique Detonation at Hyper Velocities," *Progress in Aeronautics and Astronautics*, Vol. 133, 1991, pp.187-204.
- Viguier, C., Figueira da Silva, L.F., Desbordes, D. and Deshaies B., "Onset of Oblique Detonation Waves: Comparison Between Experimental and Numerical Results for Hydrogen-Air Mixtures," *Proceedings of the The Combustion Institute*, Vol. 26, 1996, pp.3023-3031.
- Thaker, A. A. and Chelliah, H. K., "Numerical prediction of oblique detonation wave structures using detailed and reduced reaction mechanisms," *Combustion Theory and Modeling*, Vol.1, 1997, pp. 347-76.
- Papalexandris, M. V., "A numerical study of wedge induced detonations," *Combustion and Flame*, Vol.120, 2000, pp.526-38.
- Figueira da Silva, L. F., and Deshaies, B. "Stabilization of an oblique detonation wave by a wedge: A parametric numerical study," *Combustion and Flame*, Vol. 121, 2000, pp.152-66.
- Fusina, G., Sislian, J. P., and Parent, B., "Formation and Stability of Near Chapman-Jouguet Standing Oblique Detonation Waves," *AIAA Journal*, Vol. 43, No. 7, July, 2005 pp. 1591-1604.
- Choi, J.-Y., Ma, F., and Yang, V., "Numerical Simulation of cellular Structure of Two-Dimensional Detonation Waves", AIAA Paper 2005-1174, 43rd Aerospace Science Meeting and Exhibit, Reno, NV, 2005.
- Austin, J. M., Pintgen, F. and Shepherd, J.E., "Reaction Zones in Highly Unstable Detonations," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.30/2, 2004.
- Lehr, H. F., "Experiment on Shock-Induced Combustion," *Astronautica Acta*, Vol. 17, Nos. 4 & 5, 1972, pp. 589-597.