

원형관 내 데토네이션 파 구조 및 동적 특성 수치 연구

조덕래* · 김종관* · 장근진* · 최정열†

Numerical Study of Detonation Wave Structure and Dynamics in a Circular Tube

Deok-Rae Cho* · Jong-Kwan Kim* · Keun-Jin Jang* · Jeong-Yeol Choi*†

ABSTRACT

Numerical studies were performed to investigate the three-dimensional front structure and dynamics features of detonation wave propagating in a circular tube such as Pulse Detonation Engine (PDE). By carrying out a series of parametric study using one step irreversible Arrhenius kinetics model, mechanisms of the three-dimensional front structure were investigated for two-, three-, four and six-cell mode detonations. A comparison with two-dimensional results, the effects of slapping transverse waves in radial direction were confirmed. In the all multi-cell modes, the detonation front structures and smoked-records on the wall are formed by the propagation of transverse waves along the wall in clockwise and counter-clockwise while the slapping move in radial direction. And the strength of reflected waves on the curved wall is changed by the multi-dimensional confinement effect.

초 록

펄스 데토네이션 엔진과 같이 원형 관내를 전파하는 데토네이션 파의 삼차원 파면 구조 및 동적 특성을 파악하기 위한 수치 해석을 수행하였다. 비가역 Arrhenius 반응 모델을 이용하여 일련의 pre-exponential 값에 대한 해석을 수행하여 2-셀, 3-셀, 4-셀 및 6-셀 데토네이션 모드의 삼차원 파면 구조에 대한 생성 매커니즘들을 살펴보았다. 2차원 결과와 비교하여 반경 방향으로 slapping 횡단 파의 효과를 확인하였으며, 모든 다중-셀 모드에서 벽면에서의 데토네이션 파면 구조와 그을음 막 기록 들은 반경 방향으로 slapping 파가 움직이는 동안 시계 및 반 시계 방향으로 움직이는 횡단파에 의하여 형성되며, 굽어진 벽면에서 반사되는 횡단파는 다차원 confinement 효과에 의하여 강도가 변화한다.

Key Words: Detonation Wave (데토네이션 파), Cell Structure(셀 구조), Circular-tube(원형 관), Multi-Cell Detonation(다중-셀 데토네이션), Numerical Simulation(수치 해석)

1. 서 론

펄스데토네이션 엔진을 비롯한 데토네이션 추

진 분야는 지난 이 십년 동안 데토네이션 연구에서 주요 관심 분야 중 하나이다. 데토네이션 파가 횡단파들의 삼차원 상호작용에 의하여 유지된다는 것이 알려진 이후로 데토네이션 파면 구조와 동적 특성은 데토네이션 가능성 주제에

* 부산대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: aerochoi@pusan.ac.kr

관한 연구 주제였다. 비록 Smoked-foil 기록이 데토네이션 파 구조를 조사하기 위하여 주어진 2차원 데토네이션 특징을 시각화하는 기법으로 기본적으로 사용되어 왔지만[1], 삼차원 구조에 대한 실험적 관찰은 데토네이션의 극단적인 빠른 속도와 폭발 특징 그리고 격렬한 발광에 의하여 매우 제한적이다. Penyazkov 등은 실험적 연구를 통하여 원형관에서 가스상 데토네이션의 다공성 구조의 변화와 초기 압력의 함수로 기술풀을 실험적 연구를 통하여 조사하였다[3,4].

수치 연구는 데토네이션 파 구조와 동적특징을 연구하는데 유용한 수단이다. 이번 연구의 목적은 원형 관에서 일련의 매개변수 연구를 통하여 다중-셀 구조와 동적 특징에 대하여 조사하는 것이다.

2. 물리적 모델링과 수치적 접근법

2.1 물리적 모델링과 수치해석법

수치 해석에 있어서 열화학적 매개변수들은 Austine 등의 연구에 이용되었던 값들을 사용하였다[1]. 이전 연구에서 논의한 바와 같이 반응물에 따른 반응 속도 상수 (pre-exponential factor) k 는 격자 해상도와 강하게 연계되어 있으므로 주어진 격자 해상도 내에서 셀 구조를 포착 할 수 있는 값을 택하였다[5]. 유체 동역학 방정식은 유한 체적 cell-vertex 기법에 의하여 이산화 하였으며, 셀 경계에서의 수치적 플러스는 3차 정확도의 MUSCL-type TVD 기법에 의하여 Roe의 근사 리만 해법으로 계산하였다[6]. 이산화 방정식은 4차 정확도의 Runge-Kutta 기법을 이용하였으며 MPI (The Message Passing Interface standard) 표준 라이브러리를 이용하여 계산 영역 분할 기법으로 병렬화를 수행하였다.

2.2 수치 영역 및 조건

계산에 사용된 주 격자는 326(길이방향)×41(반경방향)×164(원주방향) 개다. Choi[5] 등은 발영 영역 길이가 데토네이션 셀 구조 묘사를 위한 여러 수치적 문제를 조사하는데 있어서 격자

해상도를 측정하는데 더 적절함을 보였다. 그들은 신뢰될 만한 셀 구조를 포착할 수 있는 최소 격자점은 발영영역에서 최소 5개 이상임을 결론 내었다. 그래서 Pre-exponential 값 $k=1,000$ 에서 2,000까지는 이 격자로 셀 구조를 포착하는데 충분하다. 하지만 $k=2,500$ 에서는 기존 격자로는 해상도가 불충분 하므로 격자를 634(길이방향)×102(반경방향)×321(원주방향)로 하여 계산하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 Two-cell 모드 데토네이션

Figure 1은 two-cell 모드 데토네이션에서 일련의 시간순서에 따른 데토네이션 파면과 원형관의 횡단면 AA'에서의 반응 진행율의 분포와 함께 벽면에서의 수치적 smoked-foil 기록을 보인 것이다. 중심에서의 충돌 후 굽어진 횡단 파들은 관의 벽면에서 순차적으로 충돌한다. 이 순간에 사각형 파들의 측면들은 이러한 횡단파 충돌과 함께 slapping 파들로서 교차하게 된다. Slapping 파의 역할은 데토네이션 파의 전파가 관찰되는 직사각형 관에서와 매우 유사하다. 하지만 다른 점은 새로운 파가 직사각형 관에서보다 더 굽어졌다는 것이다. 이것이 원형 관에서 굽어진 벽면이 직사각형 관에서보다 새로운 횡단 파를 더 강하게 만드는 역류효과를 더 많이 주는 이유이다.

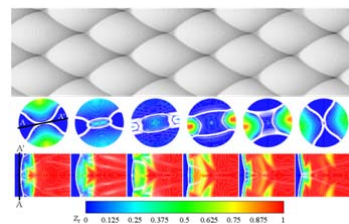


Fig. 1 Numerical smoked-foil record and a time sequence of detonation wave front for two-cell mode

3.2 Two-cell 모드 데토네이션의 2D 및 3D 결과 비교

2차원 과 3차원 파의 동적 특징의 상대적 비교를 위하여 채널 폭이 π 인 계산 영역에 대한 2차원 해석을 수행하였다. Fig. 2는 3차원 해석에서의 벽면 압력 분포를 2차원 해석 결과와 비교한 그림이다. 횡단 파들의 충돌 지점들의 간격은 동일하고 전체적인 결과들은 양쪽 모두 매우 비슷한 양상을 보인다. 주목할 만한 차이점은 3차원 결과에서 파들이 상호작용하는 지점에서는 더 높은 압력이, 팽창하는 영역에서는 더 낮은 압력이 보인다는 것이다. 또한 원형관의 역류 효과에 의한 강한 국소 폭발에 기인한 결과들이 2차원보다 3차원 데토네이션 파면이 더 큰 곡률을 보이는 결과가 주목할 만하다.

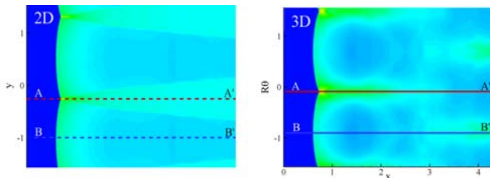


Fig. 2 Comparison of instantaneous pressure distributions of two-dimensional simulation

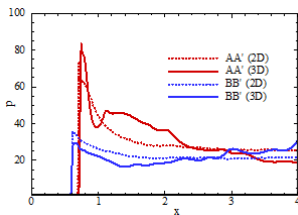


Fig. 3 Comparison of pressure variations in two- and three-dimensional simulations

압력 수준의 정량적인 비교를 위하여 AA'와 BB' 구간에서의 압력 변화를 Fig. 3에 보였다. AA'는 횡단 파들의 충돌에 의한 국소 폭발 지역이며, BB'는 전파되는 데토네이션 파의 중간 부분이다. AA'을 따라서 2차원 결과는 파 선두에서의 정점 압력 이후로 점진적인 후류 팽창을 보여준다. 하지만 3차원 결과는 2차원 결과보다도 더 높은 정점 압력과 더 낮은 후류 압력을 보여준다. 또한 반대로 3차원 결과는 2차원에서보다 더 낮은 정점 압력과 더 높은 후류 압력을

보여주고 있다. 이러한 결과는 관의 중심으로부터 다가오고 벽면에서 반사되고 있는 slapping 파의 효과로 생각되어진다. 하지만, slapping 파가 각 위치에서 다른 전파 속도를 가지는 곡률이 있는 충격파인 관계로 벽에서 slapping 경우는 축 지점들에 따라서 다르다. 따라서 3차원 결과의 후류 압력 수준은 2차원 결과에서 보다 더 강한 변동 보인다.

3.3 다중셀 모드 데토네이션

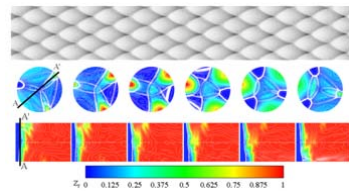


Fig. 4 Numerical smoked-foil record and a time sequence of detonation wave front for three-cell mode

Figure 4는 pre-exponential 값을 $k=1,500$ 으로 증가시킨 후 계산한 결과에 의한 three-cell 모드 데토네이션에서 일련의 시간순서에 따른 데토네이션 파면과 원형관의 횡단면 AA'에서의 반응 진행율의 분포와 함께 벽면에서의 수치적 smoked-foil 기록을 보인 것이다. 여기서는 상호작용하는 횡단 파들이 직사각형 관의 결과와 다르게 반드시 직교할 필요가 없음을 확인 할 수 있다.

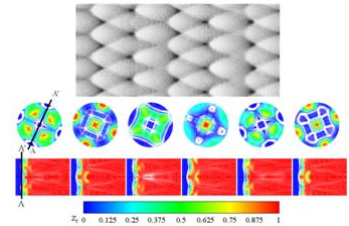


Fig. 5 Numerical smoked-foil record and a time sequence of detonation wave front for Four-cell mode

Figure 5는 $k=2,000$ 으로 증가 한 경우에 발생하는 four-cell 모드 데토네이션에서의 일련의 시간

순서에 따른 데토네이션 파면과 원형관의 횡단면 AA'에서의 반응 진행율의 분포와 함께 벽면에서의 수치적 smoked-foil 기록들이다.

데토네이션 파면은 사각형과 관 중심에서 합쳐지고 외부로 팽창하는 네 개의 날개를 가진 풍차 형상 사이를 주기적으로 반복하여 변화하고 있다. 또한 셀 재 생성지점 간의 위상 차는 약 90°가 된다.

앞서 언급한 것처럼 pre-exponential 값을 $k=2,000$ 으로 증가한 경우 기존의 격자의 불충분한 해상도로 인한 데토네이션 셀 생성이 되지 않음에 따라 더 나은 해상도를 가진 격자계로 계산을 수행하였다. 이 격자 계는 기존 격자보다 한 방향으로 약 2배정도의 더 나은 해상도를 가지나 반면에 격자 수의 증가와 계산 시간 간격의 감소로 인하여 약 20배 정도의 더 긴 계산 시간을 요구하게 된다.

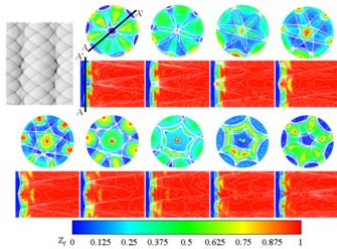


Fig. 6 Numerical smoked-foil record and a time sequence of detonation wave front for six-cell mode

Figure 6은 six-cell 모드 데토네이션에서 일련의 시간순서에 따른 데토네이션 파면과 원형관의 횡단면 AA'에서의 반응 진행율의 분포와 함께 벽면에서의 수치적 smoked-foil 기록들이다. 이 해상도의 결과에서 주목할 한 가지는 다수의 파들이 반경 방향으로 움직이는 동시에 파 상호작용을 더 복잡하게 만드는 반경 방향의 각 열을 따라서 서로 교차하고 있다는 것이다. Smoked-foil 기록과 파 단면의 그림으로부터 앞의 결과들과 다소 구별되는 관 벽면에서 다수의 횡단 파들의 slapping의 상호작용으로 간주되는

수직 파 무늬들의 형상이 보여진다. Two-, three-, four- 그리고 six-cell 모드들의 결과로부터 셀 폭이 관 둘레로 따라서 $\lambda = D\pi/\sqrt{k}$ 계산되는 값과 잘 일치됨을 확인할 수 있었다. 여기서 D 는 원형 관의 직경이며, N 은 정수 값으로 데토네이션 셀 모드와 동일한 값을 가진다.

4. 결론

제어 매개 변수로서 pre-exponential 값을 이용하여 원형 관에서 다중-셀 데토네이션 모드의 생성 매커니즘에 대하여 살펴보았다. 2차원 해석 결과와 함께 벽면을 따라 벽면 압력의 비교로부터 정점 압력의 변화와 선두 파면 후방에서의 압력 수준이 삼차원 결과에서 더 크다는 것을 제외하고는 매우 유사함을 확인하였다. 이것은 직사각형 관에서 관찰되는 것과 유사한 벽면에서의 slapping과 반사되는 반경방향으로 움직이는 횡단 파들의 존재에 기인한다. 하지만 원형의 환경에서의 억류 효과는 2차원과 삼차원 직사각형 관에서 보다 더 강한 파의 상호작용에 의한 새로운 폭발을 만든다. 또한 직사각형 관에서와는 다르게 원형 관에서는 교차하는 파들이 반드시 직교할 필요가 없다는 것을 확인하였다.

참고 문헌

1. J.M. Austin, F. Pintgen, J.E., Shepherd, J. E., Proc. Combust. Inst. 30 (2005) 1849-1858.
2. O.V. Achasov, O.G. Penyazkov, Shock Waves. 11 (2002) 297-308.
3. O.G. Penyazkov, K.L. Sevrouk, On critical conditions of the flow within the cellular detonation structure, 21st ICDERS (2007).
4. J.Y. Choi, F. Ma., V. Yang., Comb. Explo. Shock Waves 44 (2008) 560-578.
5. J.Y. Choi, I.S. Jeung, Y. Yoon, AIAA J. 38 (2000), pp.1179-1195