원형 관 내부에서의 3차원 데토네이션 파의 동적모형

조덕래* · 원수희** · 신재렬* · 최정열***

Three-dimensional Detoantion Wave Dynamics in a Circular Tube

Deokrae Cho* · Soo-Hee Won** · Jae-Ryul Shin* · Jeong-Yeol Choi***

ABSTRACT

The three-dimensional structure of detonation wave propagating in a circular tube was investigated using a parallel computational code developed previously. A series of parametric study for a circular tube of a fixed diameter gave the formation mechanism of the detonation cell structures depending on pre-exponential factor, k. The unsteady results in three-dimension showed the mechanisms of two, three and four cell mode of detonation wave front structures. The detonation cell number was increased but cell width and length were decreased with increased pre-exponential factor k. In the all multi-cell mode, the detonation wave structure and smoked-foil records on the wall are made by the moving of transverse waves. The detonation wave front structures have the regular polygon and windmill shapes periodically.

초 록

이전에 개발된 병렬 해석 코드를 이용하여 원형 관내에서의 삼차원 데토네이션 파 전파 특성을 관찰하였다. 일련의 해석을 통하여 직경이 일정한 원형 관에서 반응 속도 상수 값 k에 의존하는 데토네이션 셀 생성 메커니즘을 알 수 있었다. 삼차원 유동에 대한 비정상 유동의 해석 결과는 two-, three-, four-cell 구조의 메커니즘을 잘 보여주었으며, 반응속도 상수 k가 증가함에 따라 생성되는 셀 수가 증가하고 셀의 폭과 길이는 감소하였다. 모든 다중-셀 모드에서 데토네이션 파의 구조와 그을음 막 기록은 횡단파의 움직임에 의하여 만들어지며, 데토네이션 파면은 주기적으로 일정한 다각형 및 풍차 형상을 가지게 된다.

Key Words: Detonation(데토네이션), Circular Tube(원형관), Detonation Cell Structure(데토네이션 셀 구조), Multi-Cell Mode(다중-셀 모드)

1. 서 론

데토네이션 현상은 충격파에 의하여 유도되는 연소파가 빠르게 반응 혼합물을 지나거나 열적

† 2008년 4월 3일 접수 ~ 2008년 5월 13일 심사완료
* 학생회원, 부산대학교 대학원 항공우주공학과
** 학생회원, 서울대학교 대학원 항공우주공학과
*** 종신회원, 부산대학교 항공우주공학과
연락저자, E-mail: aerochoi@pusan.ac.kr

합성물을 통과할 때 발생한다. 데토네이션 현상에 대한 연구는 약 120년 동안 석탄 갱도의 폭파와 같은 공학적인 안정성 분야와 별의 폭발과 같은 천체 물리학의 과학적인 관점, 그리고 스크램젯 엔진의 일종인 경사 데토네이션 파 엔진(CDWE), 램 가속기, 펄스 데토네이션 엔진(PDE) 그리고 회전 데토네이션 엔진(RDE)과 같은 추진 기관 응용분야로서 연구가 진행되고 있다. 데토네이션 파의 특성과 구조에 대한 연구는 많은 이론가 및 실험가들의 연구에 의하여 수행되어 왔으며, 이들에 의하여 기초적이고 중요한 정보가 알려졌다. 하지만 데토네이션 파의 빠른 전파 특성과 함께 실험적 연구만으로는 데토네이션 파의 삼차원 형상에 대한 시각화가 어렵기 때문에, 많은 연구에도 불구하고 가장 일반적인 관의 형태인 원형 관내를 전파하는 데토네이션 파의 삼차원적인 구조는 아직 정확하게 파악되지 않고 있다[1-4].

데토네이션 파의 삼차원 구조는 최근의 고성능 컴퓨터에 힘입어 수치적 해석 연구 결과로서 차츰 그 특징이 밝혀지고 있다. 그 중 직사각형 관내에서 데토네이션 파의 구조는 대각선 및 직사각형 모드를 가지며, 이 두 가지 모드의 형상과 그 특징이 보고된 바 있다.[5-7] 또한 데토네이션이 발생 가능한 임계 영역 부근에서 발생하는 회전 데토네이션 현상에 대한 모사도 성공적으로 이루어 졌다.[8,9] 원형 관에서는 이론 및 실험에 의하여 단일 회전 모드 (single spinning mode) 및 다중-셀 모드 (multi-cell mode) 또는 다중-헤드 모드(multi-headed mode)에 대하여 연구가 수행되어 왔으나,[2,3] 수치 모사를 통한 통하여 파면 구조의 삼차원적 동적 특성이 알려진 것은 아직 없다.

일반적으로 데토네이션 파 수치 묘사의 신뢰성은 유체역학적 불연속면과 반응 영역을 충분한 정도의 공간 분해능으로 잘 포착하느냐에 달려있다.[10] 따라서 데토네이션 파면의 삼차원 거동에 대한 수치적 모사를 위해서 공간 분해능을 삼차원 적으로 유지하며 주기적 운동이 포착될 때까지의 긴 계산 시간이 필요로 하므로 기억 용량 및 연산 처리 능력이 우수한 고성능의 전산 처리 장비를 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 이전의 연구를 통하여 개발된 데토네이션 파의 삼차원 병렬처리 해석 코드를 이용하고[7,11], 데토네이션 파의 동적 거동을 포착하기 위한 수치적 조건에 대한 지식을 바탕으로, 원형 관내를 전파하는 데토네이션 파에 대한 삼차원 해석을 수행하여 다중-셀 데토네이션 파 모드에 대한 동적 거동 특성을 살펴보았다.

2. 물리적 모델 및 수치 해석 기법

2.1 지배 방정식

삼차원 압축성 반응 유동에 대한 3차원 Euler 방정식은 벡터 형태로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial y}+\frac{\partial \boldsymbol{G}}{\partial z}=\boldsymbol{H} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho w\\ \rho e\\ \rho Z\end{bmatrix}\ \boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}\rho u\\ \rho u^2+p\\ \rho uv\\ \rho uw\\ (\rho e+p)u\\ \rho Zu\end{bmatrix}\ \boldsymbol{F}=\begin{bmatrix}\rho v\\ \rho uv\\ \rho v^2+p\\ \rho vw\\ (\rho e+p)v\\ \rho Zv\end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}\rho w\\ \rho uw\\ \rho vw\\ \rho w^2+p\\ (\rho e+p)w\\ \rho Zw\end{bmatrix}\qquad \boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ \rho\dot{\Omega}\end{bmatrix} \quad (2b)$$

여기서 $\boldsymbol{Q}$ 보존변수 벡터이며, $\boldsymbol{E},\boldsymbol{F},\boldsymbol{G}$ 는 플럭스 벡터 그리고 $\boldsymbol{H}$ 는 생성 항에 대한 벡터이다. ρ는 밀도, u,v,w는 각 방향의 속도 성분, e는 단위 체적당 전체 에너지를 나타내는 변수이다. 그리고 압력은 상태 방정식으로부터 다음과 같이 정의 된다.

$$p=(\gamma-1)\rho\left\{e-\frac{1}{2}(u^2+v^2+w^2)+Zq\right\} \quad (3)$$

생성물의 질량 분율을 나타내는 반응과정 변수 Z는 0에서 1사이의 값을 가진다. q는 연소에 의

한 발열량이다. 반응 진행 변수에 대한 비열 비 값은 미연 상태와 기연 상태로부터 보간법에 의하여 구하였다. 비열비 $\gamma(Z)$는 보존 법칙과 이상기체 가정을 만족하는 Z의 함수로 표현된다. 데토네이션의 실제 반응 과정은 해석이 복잡하고 많은 계산 시간을 요구하므로 열-유체역학적 특징만을 살펴보기 위해서는 간단한 1단계 비가역 Arrhenius 반응 모델을 이용하는 것이 편리하다. 이 경우 식(1)의 반응 물질의 질량 생성율은 다음 식과 같이 정의된다.

$$\dot{\Omega} = (1-Z)k\exp(-E_a\rho/p) \qquad (4)$$

여기서 k는 반응속도 상수, E_a는 반응물질의 질량당 활성화 에너지를 나타낸다.

2.2 열역학적 매개 변수

본 연구는 데토네이션 파의 기본적인 삼차원적 구조 및 특징에 대한 이해도를 높이는데 그 목적이 있으므로 계산은 약한 불안정 데토네이션 영역으로 제한시켜 수행하였다. 수치 해석에 있어서 열화학적 매개변수들은 이전의 이차원 및 삼차원 데토네이션 셀 구조에 대한 수치 해석 연구에 이용되었던 값들을 사용하였다[4,7,10]. 미연 및 기연 가스의 비열 비는 각각 1.602와 1.288이다. von Neumann peak(T_{VN}) 온도로 무 차원화한 약한 불안정 데토네이션 영역의 활성화 에너지는 $\theta \equiv E_a/RT_{VN} = 5.2$ 을 이용하였다. 여기서 R은 반승기체 상수이다. 이전 연구에서 논의한 바와 같이 반응물에 따른 반응 속도 상수 (pre-exponential factor) k는 격자 해상도와 강하게 연계되어 있으므로 주어진 격자 해상도 내에서 셀 구조를 포착 할 수 있는 값을 택하였다.

2.3 계산 영역과 격자

3차원 데토네이션 파에 대한 계산 영역은 원형 단면을 가진 관이다. 전단면에서 반경 방향의 간격은 일정하며, 원주 방향의 길이는 반경이 증가함에 따라 같이 증가하는 격자 시스템을 가진다. 길이 방향, 즉 파의 진행 방향으로는 계산 영역의 후방 출구영역을 제외하고는 길이 방향으로 일정한 격자 폭을 가지며, 관의 직경은 1.0이고, 길이 방향으로 격자 비가 균일한 영역의 크기는 2.0이다. 후방영역은 출구 경계 지점에서의 *C-J* (Champman-Jouguet) 조건을 만족시킨다. 또한 격자수의 증가로 인한 컴퓨터 메모리 사용량의 증가를 피하는 동시에 계산소요 시간을 줄이기 위하여 후방 출구 영역에서는 길이 방향으로 점진적으로 격자 비를 늘린 격자 계를 사용하였다. 길이 방향의 격자가 균일한 영역 내에서 안정된 주기를 가진 데토네이션 파의 진동을 유지하도록 계산 영역의 길이는 직경의 약 4.5배의 길이를 가지도록 택하였다. 데토네이션 셀 구조를 포착하기 위한 격자 해상도 요구 조건에서 해상도는 반응 속도 상수 k와 강하게 연계되어 있다. 즉, 고정된 격자 계에서 작은 k 값은 큰 셀 크기와 함께 상대적으로 높은 해상도를 보이는 반면, 큰 k 값은 상대적으로 낮은 해상도를 가진다. 또한 정상 ZND(Zel'dovichiNeumann-Döring) 구조의 해석 해에서 von Neumann peak 후방 발열 영역에 5개 이상의 격자가 포함되면 데토네이션 파의 불안정 정도에 관계없이 데토네이션 셀 구조를 포착할 수 있다[10]. 따라서 본 연구에서는 고정된 격자 계에서 데토네이션 셀 구조를 포착할 수 있도록 pre-exponential 인자 k의 값은 2,000이하로 제한하여 사용하였다.

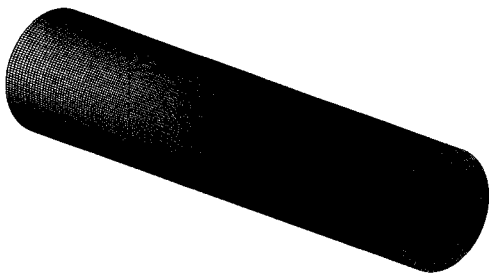


Fig. 1 The computational mesh system with 326×41×164 grid points.

2.4 초기조건과 경계조건

데토네이션 파 전파에 대한 해석에서 초기 조

건은 모든 격자점에 격자계의 길이 방향으로 정상 ZND 구조의 해석 해의 결과를 적용시켰다. 빠른 불안정 유동을 유도하기 위하여 초기 조건에 비대칭적인 임의의 교란을 가하였다[2]. 입구 유속, U_∞는 C-J 데토네이션 속도, U_{CJ}로 고정하였다. 즉, overdrive인자 $f=(U_\infty/U_{CJ})^2=1.0$의 값을 가진다. 출구에서는 C-J 조건을 이용한 특성 경계 조건을 다음과 같이 적용하였다.

$$p_{exit}=p_{CJ} \tag{5a}$$

$$\rho_{exit}=\rho_1+(p_{exit}-p_1)/c_{CJ}^2 \tag{5b}$$

$$u_{exit}=u_1+(p_{exit}-p_1)/(\rho c)_{CJ} \tag{5c}$$

여기서 하 첨자 1은 출구 경계에 바로 이웃한 셀에서의 값을 나타낸다. 벽면에서는 단열 및 slip 조건을 부였다.

데토네이션 파의 해석에서 파의 불안정을 대표하는 삼중점의 운동은 관 내벽 (0~2π) 에서 삼중점의 시간 및 횡방 운동 기록 또는 x-t선도로 간주할 수 있는 수치적 그을음 막 기록(smoked-foil record)을 이용하여 분석하였다.

Fig. 2 Initial distribution of reaction progress variable for 3-D model

2.5 유체 동역학적 해석 알고리즘

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[12]. 이산화 방정식은 4차 정확도의 Runge-Kutta 기법을 이용하였다. 삼차원 해석을 위하여 해석 코드는 MPI (The Message Passing Interface standard) 표준 라이브러리를 이용하여 계산 영역 분할 기법으로 병렬화를 수행하였다.[7]

3. 결과 및 토의

3.1 Two-Cell 데토네이션 모드

Figure 3은 반응 속도 상수 값 k=1,000으로 하여 계산을 수행하였을 경우 나타나는 two-cell 데토네이션 모드의 파면 형상을 보여주고 있다. 파면의 형상은 일정한 주기를 가지고 규칙적인 반복된 형상이 나타나게 된다. Fig. 3에서의 반복 횟수의 주기는 약 8000번이며, 파면의 변화는 상단 왼쪽부터 시작하여 오른쪽 끝가지 변하며 이어서 하단 왼쪽부터 시작하여 오른쪽으로 차례로 변화되어 간다. 하단 오른쪽 끝 파면 이후에는 다시 상단 왼쪽 끝의 파면이 나타나는 순서로 파면형상이 일정하게 반복된다. 그림에서 대문자 I 는 반복 계산 회수를 나타내고 있다.

Figure 4는 임의의 시간에서 two-cell 데토네이션 모드의 전방 충격파의 파면 구조를 보인 것이다. Fig. 3-(b)는 파의 후방에서 본 형상으로, 화살표는 횡단파의 진행방향 및 횡단파의 수를 나타낸 것이다. 음영이 강한 영역은 상대적으로 압력인 높은 부분으로서 벽면에서는 삼중점(triple-point)으로 파면 내부에서는 삼중선(triple-line)으로 간주되며, 이들은 횡단파의 진행방향 및 수와 동일하다. 즉 하나의 삼중점 또는 삼중선은 하나의 횡단파로 간주할 수 있다. 벽면을 따라 움직이는 삼중점의 궤적에 의하여 만들어지는 흔적이 그을음 막 기록이다. 여기서는 원주 방향으로 움직이는 4개의 횡단 파, 즉 삼중점의 움직임에 의하여 two-cell 데토네이션 모드, 즉 2개의 데토네이션 셀이 만들어진다. 이들 횡단파들은 또한 반경방향으로 움직이는 2개의 횡단파와 함께 two-cell 데토네이션 모드의 특징적인 파면 구조를 형성하게 된다. 그리고 횡단파의 수가 증가함에 따라 셀 수 및 파면 형상이 바뀌어서 또 다른 다중-셀(multi-cell) 데토네이션 모

드 현상을 보이게 된다.

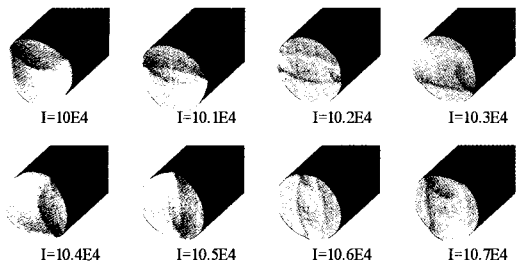
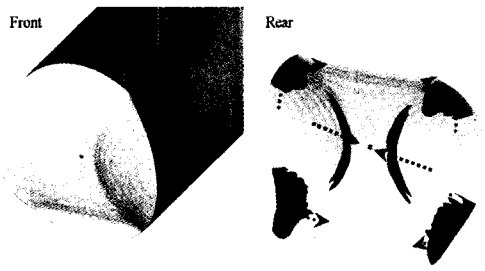


Fig. 3 Evolutions of detonation wave oscillation on regular zone in the two-cell detonation mode



(a) (b)

Fig. 4 The leading shock wave front (a) and rear side (b) structure in the two-cell detonation mode

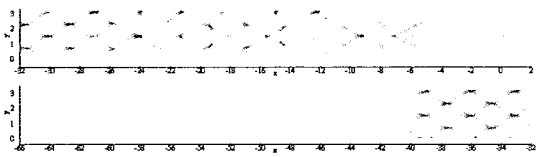


Fig. 5 Numerical smoked-foil records for two-cell detonation mode with 326×41×164 grid at k=1,000.

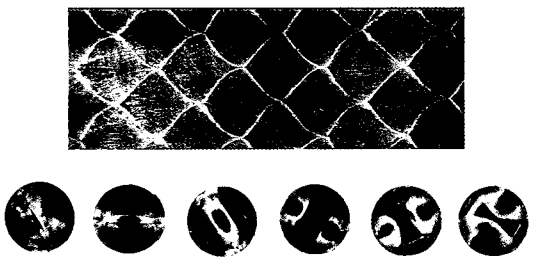


Fig. 6 Experimental smoked-foil records for two-cell detonation mode in a round tube' wall and front-end, by Penyazkove and Sevrouk[5].

Fig. 5는 벽면에서 삼중점에 의하여 만들어지는 수치적 그을음 막 기록을 보여준다. 이 기록으로부터 초기조건의 영향이 사라지는 일정 시간의 천이 영역 후에 2개의 셀이 만들어지는 규칙적인 two-cell 데토네이션 모드가 나타남이 확인된다. Penyazkove 등에 의하면 다중-셀 모드에서 셀 폭은 $\lambda = \pi D/N$의 관계식으로 결정된다.[2,3] 여기서 D는 원형 관의 직경이며, N은 정수 값으로 데토네이션 셀 모드와 동일한 값을 가진다. 이 식은 일정한 직경을 가진 원형 관에서 다중-셀 모드의 셀 수가 증가함에 따라 셀 폭은 줄어드는 것을 의미한다. 이것은 이 후 나오는 three-cell 및 four-cell 데토네이션 모드의 해석 결과에 의하여 확인된다. two-cell 데토네이션 모드에서 N=2의 값을 가지며, 이번 연구에서 관의 직경 D=1의 값을 가지므로 Fig. 5의 결과에서 셀 폭은 원주길이의 절반이 된다. Figure 6은 실험에서 얻어진 벽면 그을음 막 기록과 전방 파면 기록들이다. 이를 Fig. 3, Fig. 5와 비교하면 수치적 해석에 의한 결과들이 실험에 의해 얻어진 결과를 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

3.2 Three-Cell 데토네이션 모드

Figure 7은 반응 속도 상수 k를 1,500으로 증가 시켜서 계산하였을 경우 발생하는 three-cell 데토네이션 모드의 시간의 변화에 따른 파면 구조를 보인 것이다. Three-cell 데토네이션 모드에서는 two-cell 데토네이션 모드보다 횡단 파의 수가 증가하였다. 반경방향으로는 3개의 횡단파가 원주 방향으로는 6개의 횡단파가 존재하게 된다. Fig. 8은 Fig. 4에서와 같이 임의시간에 횡단 파에 의하여 만들어지는 three-cell 데토네이션 파면 구조의 한 형상이다. 화살표는 횡단파의 진행 방향과 수를 나타내고 있다. Three-cell 데토네이션 모드에서 파면은 이들 횡단파들에 의하여 규칙적인 구조를 보여준다. 어떤 시점에서는 원주 방향으로 움직이는 6개 횡단파가 세 점에 모여 삼각형의 세 꼭지 점을 이루고, 반경방향으로 움직이는 3개의 횡단 파는 세변을 이루

는 삼각형 모양을 보여준다. 또 다른 시점에서는 관 중심으로부터 반경방향으로 세 개의 날개를 가진 회전 날개 형상을 보여준다. 이들 날개와 날개 사이의 각은 거의 동일한 것으로 확인된다. 이 두 형상 사이에서 파면 형상은 규칙적으로 반복된다.

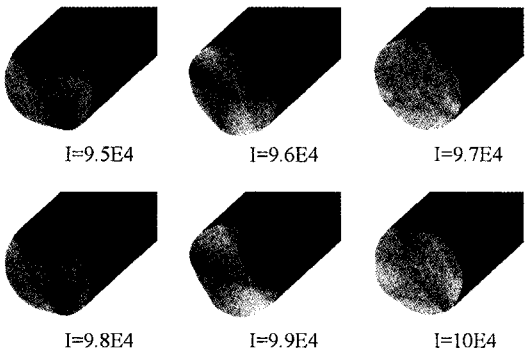
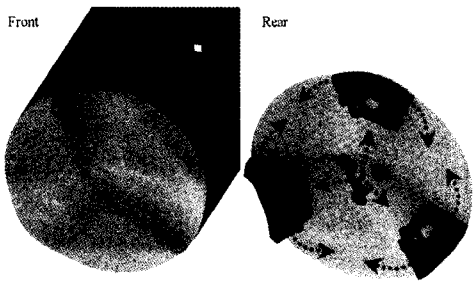


Fig. 7 Evolutions of detonation wave oscillation in the three-cell mode.



(a) (b)

Fig. 8 The leading shock wave front (a) and rear side (b) structure in the three-cell mode.

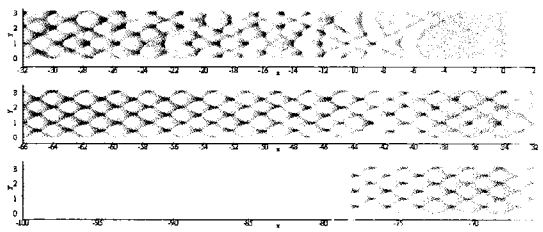


Fig. 9 Numerical smoked-foil records for the three-cell mode with 326×41×82 grid at k=1,500.

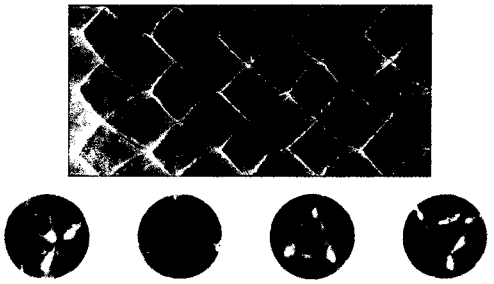


Fig. 10 Experimental smoked-foil records for the three-cell mode in a round tube' wall and front-end, by Penyazkove and Sevrouk[5].

그을음 막 기록에는 원주 방향으로 움직이는 6개의 횡단파의 궤적에 의하여 3개의 셀이 생성되는데, 이 흔적은 Fig. 9와 Fig. 10의 수치적 연구와 실험적 연구에 의한 그을음 막 기록으로부터 확인된다. 아울러 Fig. 7의 파면 형상은 Fig. 10에서 실험적으로 얻어진 단면의 그을음 막 기록에 의하여 얻어진 파면 형상과도 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9의 수치적 그을음 막 기록은 three-cell 데토네이션 모드가 초기조건의 영향이 사라지는 시간부터는 규칙적인 셀 패턴을 보여주고 있다. 이는 파면 구조가 일정한 주기로 진동함을 의미한다. 즉 Fig. 9에서 일정한 패턴의 셀 구조를 가진 영역은 Fig. 7의 파면 구조의 규칙적으로 반복된 움직임에 의하여 생성된 것을 의미한다. 셀 폭의 크기 $\lambda = \pi/3$가 되며, 이는 two-cell 모드의 2/3배가 된다.

3.3 Four-Cell 데토네이션 모드

Figure 11부터 Fig. 13까지의 그림들은 four-cell 데토네이션 모드에서의 파면 형상과 수치적 그을음 막 기록들이다. Fig. 11은 일정 시간 간격을 두고 파면 형상의 변화를 보여주고 있으며, Fig. 12는 임의의 한 시점에서 파면의 형상과 횡단파의 수와 그 진행방향을 나타낸 것이다. four-cell 데토네이션 모드에서 파면 형상은 반경 방향으로 움직이는 4개의 횡단파와 원주 방향으로 움직이는 8개의 횡단파의 움직임에 의하여 결정되어진다. Two-cell 및 three-cell 데

토네이션 모드에서와 같이 횡단파의 움직임 방향은 같지만 횡단파의 수적 증가로 인하여 파면 형상은 또 달라진다. Four-cell 데토네이션 모드에서는 사각형 형상을 이루는 파면 구조와 4개의 날개를 가진 회전 날개 모양의 파면 구조 사이를 주기적으로 진동하는 파면 구조를 보이고 있다. 그 중간에는 Fig. 12에서 보이는 바와 같은 파면 구조가 나타난다.

Fig. 13은 four-cell 데토네이션 모드가 발생하는 수치적 그을음 막 기록으로서 앞선 two-cell 및 three-cell 모드와 같이 일정한 천이영역을 지난 후에는 안정적인 셀 생성 패턴을 보이고 있다. 셀은 수가 4개로 증가하면서 폭은 반비례하여 줄어들었다. 여기서 셀 폭의 크기는 $\lambda = \pi/4$ 이며 two-cell 데토네이션 모드에서 셀 폭의 절반크기이다. 하지만 셀 한 개의 길이는 two-cell 모드의 절반 크기보다 더 크게 나타난다. 이는 반응 속도 상수 값의 증가로 인한 영향으로서 파의 진행속도가 two-cell 및 three-cell 모드보다 더 커졌음을 보여주고 있다. 또한 이 기록으로부터 파면 구조가 사각형 형상을 이루는 경우에는 그을음 막 기록에서 확인되는 바와 같이 각 꼭짓점의 위치, 즉 셀의 재생성 지점간의 거리가 일정한 정사각형 형상을 이루고 있음을 추측할 수 있다. 이는 앞선 three-cell 데토네이션 모드에서 정삼각형 구조를 보였던 것과 비슷하다.

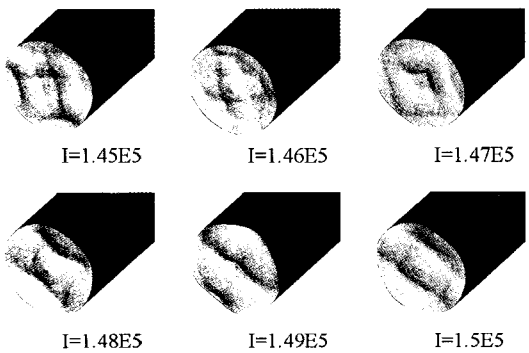


Fig. 11 Evolutions of detonation wave oscillation in the four-cell mode.

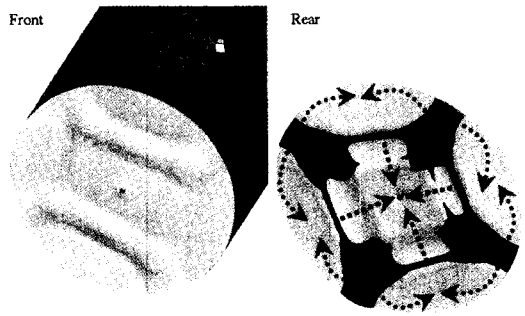


Fig. 12 The leading shock wave front (a) and rear side (b) structure in the four-cell mode.

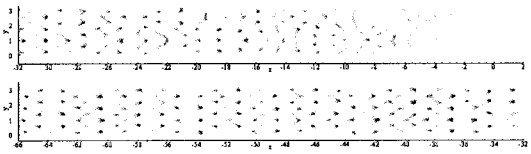


Fig. 13 Numerical smoked-foil records in the four-cell mode with 326×41×82 grid at k=2,000.

4. 결 론

본 논문에서는 이전의 연구에서는 해석적 접근 방법으로 연구된 적이 없는 원형 관내에서의 데토네이션 파의 다중-셀 구파면 구조와 생성 메커니즘 및 삼차원적 동적 특성을 알아보기 위한 수치 해석 연구를 수행하였다. 일련의 해석 결과 분석을 통하여 혼합 기체의 민감도와 관계된 반응 속도 상수 값에 따라서 서로 다른 파면 형상, 즉 다중-셀 구조가 나타남을 확인하였다. 이 중 two-cell, three-cell 그리고 four-cell 데토네이션 모드의 생성 메커니즘에 대하여 살펴보았다. 다중-셀 데토네이션 모드에서 파면 형상과 셀 생성은 관 내부에 존재하는 횡단 파에 의하여 결정되어짐을 확인하였다. 특히, 횡단 파의 수가 각각의 다중-셀 모드 마다 다르며, 이 차이에 따라 각 다중-셀 데토네이션 모드의 특징이 결정됨을 확인 하였다. 그을음 막 기록에 생성되는 셀 패턴은 모두 일정한 천이 영역 이후에는 규칙적인 셀 생성 패턴을 보여주었으며, 셀 폭이 $\lambda = D\pi/N$ 에 의해 따라 결정됨을 확인하였다.

따라서 본 연구 결과들로부터 반응 속도 상수 k가 감소하면 회전 데토네이션 모드(single spinning detonation mode)가, 증가할 경우 더 많은 횡단파들을 가진 정-다각형 구조를 만드는 다중-셀(Multi-Cell) 데토네이션 모드가 발생할 것으로 예측되며, 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Fickett, W., And Davis, W,C., *Detonation, Theory and Experiment*, Dover Publications, New York, 2000
2. Achasov, O. V., Penyazkov, O. G., "Dynamics Study of Detonation-wave Dellular Structure," *Shock Waves*, Vol.11, 2002, pp.297-308
3. Penyazkov, O. G., Sevrouk, K. L., "On critical conditions of the flow within the cellular detonation structure," 21st International Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems, Poitier, France, July. 2007
4. Austin, J. M., Pintgen, F. and Shepherd, J. E., "Reaction Zones in Highly Unstable Detonations," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.30, No.2, 2005, pp. 1849-1858
5. Tsuboi, N., Katoh, S. and Hayashi, A. K., "Three-Dimensional Numerical Simulation for Hydreogen/Air Detonation: Rectangular and Diagonal Structures," *Proceeding of the Combustion Institute*, Vol. 29, No.2, 2002, pp.2783-2788
6. Deledicque, V. and Papalexandris, M. V., "Compuational Study of Three-dimensional Gaseous Detonation Structures," *Combustion and Flame*, Vol. 144, 2006, pp.821-837
7. 조덕래, 원수희, 신재렬, 이수한, 최정열, "정사각관 내 데토네이션 파 구조의 삼차원 수치해석," 한국추진공학회지, 제11권 제1호 2007, pp.1-10
8. Tsuboi, N., Hayasi, A. K., "Numerical Study on Spinning Detonations," *Proceeding of the Combustion Institute*, Vol.31, No.2, 2007, pp.2389-2396
9. Tsuboi, N., Eto, K., Hayashi, A. K., "Detailed Structure of Spinning Detonation in a Circular Tube," *Combustion and Flame* Vol.149, 2007, pp.144-161
10. 최정열, 조덕래, "데토네이션 셀 구조 모사를 위한 수치적 요구 조건", 한국추진공학회지, 제10권 제2호 2006, pp.1-14
11. 최정열, 원수희, 신재렬, 정인석, 이창성, "Multi-Core 프로세싱 환경에서 반응 유동 해석 코드 OpenMP/MPI 병렬처리 성능", 한국항공우주공학회 2007 추계학술발표대회 논문집, pp.1297-1300
12. Choi, J.-Y., Jeung, I.-S. and Yoon, Y., "Computational Fluid Dynamics Algorithms for Unsteady Shock-Induced Combustion, Part 1: Validation," *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 7, July 2000, pp.1179-1187