환형 관내의 데토네이션 파 전파 특성 해석

이수한* · 조덕래* · 최정열**

Numerical Analysis of Detonation Wave Propagation Characteristics in Annular Channels

Su-Han Lee* · Deok-Rae Cho* · Jeong-Yeol Choi**

ABSTRACT

Present study examines the detonation wave propagation characteristics in annular channels. Numerical approaches used in the previous studies were extended with marching windows technique. Parametric study has been carried out using a radius of curvature normalized by the channel width considered as unique geometric parameter. In the channels of small radius of curvature, detonation wave is unstable and the regular cell structure is not observed. There is a critical radius of curvature where cell structure can be sustained. The effect of curvature makes the pressure difference on inner and outer surfaces where the detonation wave is overdriven. The results converge to that of straight channel as the radius of curvature gets larger, as expected.

초 록

본 논문에서는 환형 관에서의 데토네이션 파의 전파 특성을 살펴보았다. 이전의 연구에 이용된 수치 기법과 이동 계산 창 기법을 본 연구에 이용하였으며, 관 폭의 값으로 무차원화 된 곡률 반경을 유일한 기하학적 변수로 고려하여 일련의 해석을 수행하였다. 곡률 반경이 작은 환형 관에서 데토네이션 파는 불안정하여 정규적인 데토네이션 셀 구조가 나타나지 않으며 셀 구조가 유지될 수 있는 임계 곡률 반경이 존재함을 알 수 있었다. 곡률의 효과로 관의 내벽 및 외벽은 압력 차가 발생하며, 외벽 쪽에서는 overdriven 데토네이션의 경향을 가진다. 예상할 수 있는 바와 같이 곡률 반경이 커지면서 직선 관의 결과에 수렴한다.

Key Words: Detonation Wave(데토네이션 파), Annular Channel(환형 관), Effect of Curvature(곡률 효과), Critical Radius of Curvature (임계 곡률 반경), Detonation Stability (데토네이션 안정성)

1. 서 론

지난 수십 년간 데토네이션 파를 이용한 추진

† 2007년 12월 17일 접수 ~ 2008년 4월 18일 심사완료
* 학생회원, 부산대학교 대학원 항공우주공학과
** 종신회원, 부산대학교 항공우주공학과
연락저자, E-mail: aerochoi@pusan.ac.kr

기관에 대한 많은 노력이 진행 되어 왔으며, 특히 지난 십년간 펄스 데토네이션 엔진(Pulse Detonation Engine, PDE) 개발 노력은 이 분야의 선도적인 역할을 수행하였다.

PDE에서 추력은 데토네이션 발생 빈도 수(frequency)에 비례하므로 이를 증가시키는데 많은 연구의 초점이 맞추어져 왔다. 그러나 데토네이션 파를 직접 발생시키는 것은 일반적인 점화 장치로 구현하기 곤란한 매우 큰 초기 에너지가 필요하므로, 일반적으로는 디플러그레이션-데토네이션 천이 (Deflagration to Detonation Transition, DDT)과정을 이용하되 천이 길이를 짧게 하는 방법을 추구하였다. 이러한 일환으로 Frolov 는 데토네이션 관에 구부러진 관(U-bend tube)또는 고리(coil) 모양의 관을 추가함으로써, 천이를 가속 시킬 수 있음을 보인 바 있다.[1,2]

한편, 최근 들어 데토네이션을 추진기관에 이용하는 또 다른 방법으로써, 회전 데토네이션 엔진(Rotating Detonation Engine, RDE)에 대한 연구가 주목을 받고 있다. RDE의 개념은 환형 관내를 흐르는 연료/공기 혼합 기체에서 데토네이션을 발생시키고, 유량 균형에 의하여 지속적으로 회전하는 파를 유지시키는 추진기관의 고성능의 연소 방법이다. 이 개념은 1960~70년대에 미국 Nichols 등의 연구[3,4]와 러시아의 Voitsekhovskii 등의[5,6] 연구에서 제시되었으나 중단된 후, 최신의 지식과 기술을 접목하여 다시 연구가 시도되고 있다. Daniau 등은 로켓 형태의 회전 데토네이션 엔진 (CDWRE, continuous detonation wave rocket engine)을 제안하였으며,[7,8] Milanowski는 같은 개념을 공기 흡입 추진 기관에 적용하여 RDE의 이름으로 제안하였다.[9] 이러한 연구들은, 프랑스, 러시아, 일본, 폴란드, 싱가포르 등의 연구자들이 참여하는 공동 연구 형태로 진행되고 있다. Fig. 1 은 공기 흡입식 회전 데토네이션 엔진의 개념도 이다.

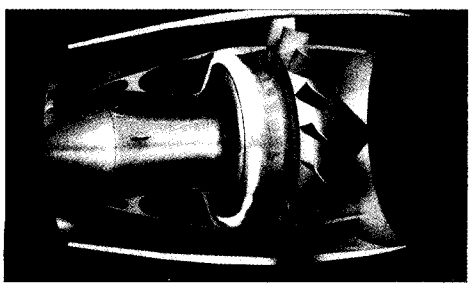


Fig. 1 Cut-way Image of Air-breathing RDE Concept

위에서 언급한 환형 관을 이용한 PDE의 DDT 가속 방법과 RDE 의 연소 방법은 곡률을 가지는 관에서 데토네이션 파 전파를 이용한다는 공통적인 특징을 가진다. 그러나 매우 간단한 기하학적 형상임에도 불구하고 이에 대한 체계적인 연구는 찾기 어려운 상황이다.[1] 따라서 본 연구에서는 곡률의 변화에 따른 데토네이션 파의 전파 특성의 변화를 알아보기 위해 환형 관에서 곡률 반경의 변화를 주어 이에 따른 데토네이션 파의 변화 특성을 연구하였으며, 이전에 논의되었던 직선 관에서의 데토네이션 현상 해석과 비교하여 회전 데토네이션 파 거동의 특성을 해석하였다. 연구를 간단히 하기 위해 이차원 형상을 적용하였으며, 채널 폭으로 무차원화 된 곡률 반경의 변화에 따른 특징을 살펴보았다.

2. 연구 내용

2.1 지배방정식과 해석 기법

반응 진행 변수, Z 를 도입한 압축성 비 점성 유동의 2차원 보존 방정식과 상태방정식은 다음의 식 (1),(2)와 같이 표현되며, 여기서 q 와 w는 각각 단위 질량 당 발열량과 생성율이다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho e\\ \rho Z\end{bmatrix}+\frac{\partial}{\partial x}\begin{bmatrix}\rho u\\ \rho u^2+p\\ \rho uv\\ (\rho e+p)u\\ \rho Zu\end{bmatrix}\frac{\partial}{\partial y}\begin{bmatrix}\rho v\\ \rho uv\\ \rho v^2+p\\ (\rho e+p)v\\ \rho Zv\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ 0\\ \rho w\end{bmatrix} \quad (1)$$

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

식 (1)의 지배방정식의 수치적 근사에는 유한체적 법을 이용하였으며, 격자 경계에서의 수치 플럭스는 RoeM 플럭스 분할 기법과 3차 정확도의 MUSCL-type TVD 기법을 이용하여 구하였

다. 시간 적분에는 4차 정확도의 4단계 표준 Runge-Kutta 기법을 이용하였다. 이상의 해석 기법들은 이전에 논문에서 검토되고 이용된 바 있다.[10,11] 본 해석 코드는 최신의 multi-core SMP 전산 환경에서 효율성을 극대화하기 위하여 OpenMP를 이용하여 병렬화하였다.

상세 반응 기구가 지배하는 데토네이션파의 연소 과정은 해석이 복잡하고 많은 계산 시간을 요구하므로 열 유체역학적 특징을 살펴보기 위한 간단한 1단계 비가역 Arrhenius 반응 모델을 이용하였다. 이 경우 식(1) 의 반응 물질의 질량 생성율은 활성화 에너지 E, 상수 k를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$w = (1-Z)k\exp(-E\rho/p) \qquad (3)$$

2.2 계산영역 및 격자계

본 연구에서는 환형 관내를 전파하는 데토네이션 파를 공간 고정 좌표계를 이용하여 모사하였다. 기본 계산 영역은 관의 폭 H 로 무차원화 하였으며, 무차원화 된 환형 관의 길이가 50.0 인 5,001 × 101 계산 영역을 선정하였다. 기본 격자는 중심선을 따른 진행 방향 격자 간격 Δx=0.01, 반경 방향 격자 간격 Δy=0.01인 격자 계를 이용하였다. 이전의 2차원 파면 구조 연구를 통하여 적절한 열화학 변수의 범위에서 위의 해상도는 데토네이션 셀 구조를 포착하기에 충분함을 보인 바 있다.[10] Fig. 2는 이해를 돕기 위하여 나타낸 2차원 환형 관 격자계의 예이다. 본 연구에서는 무차원화 된 곡률 반경 R 을 R=1.5 에서 9.0까지 변화 시켜가며, 곡률 반경에 대한 의존성을 살펴보았다.

데토네이션 전파 과정의 해석에서 유동장의 중요한 변화는 데토네이션 파면의 직 후방에서만 나타나며 파면의 먼 후방 영역은 파면의 구조에 영향을 미치지 않으므로 계산 격자계의 모든 영역을 계산하는 것은 불필요하다. 따라서 계산의 효율을 극대화 시키는 방법으로써, 계산 격자에서 중요한 변화가 나타나는 영역만을 선택하여 계산하는 진행 계산 창(marching window, MW) 방법을 이용하였다.[12] 이 경우 MW의 전

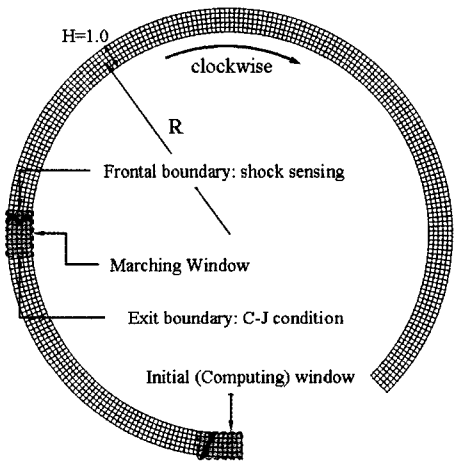


Fig. 2 Computational Domain and Grid System

방 경계는 격자 중심선을 따라 충격파 위치를 포착하여 충격파의 0.1H 전방을 입구 경계로 삼았으며, 유동이 열적 질식 상태가 되어 마하 수가 1이 되는 Chapman-Jouguet, (C-J) 조건을 만족하는 위치를 후방 경계로 선택하였다. 해석 조건과 시간에 따라 C-J 조건을 만족하는 위치가 변하므로 변동이 있기는 하지만, 이 방법을 택함으로써 MW의 크기는 대체로 100~150 × 101 정도로 유지 되었다. 결과적으로 전 경역을 대상으로 계산하는 것에 비하여 40~50 배 정도의 효율적인 계산을 수행 할 수 있었고, 이전의 연구에서 파면 부착 좌표계를 이용한 해석과[10] 같은 정도의 비용으로 계산을 수행할 수 있었으며, 구부러진 관내에서 파면 부착 좌표계를 이용하는 경우에 필요한 회전 좌표 변환 등의 어려움을 피할 수 있었다.

2.3 해석 조건

본 연구에서 가연 혼합 기체의 열화학적 조건은 이전의 연구에서[10] 약한 불안정 조건에 해당하는 값을 이용하였다. 비열비는 미연 상태에서 1.602, 기연 상태에서 1.288 이며, 불안정성의 척도를 나타내는 무차원 활성화 에너지는 5.2, 무차원화 된 열량은 24.2의 값을 가진다. 반응 속도 상수 k는 이전의 연구로부터, 주어진 해상도에서 적절한 수의 셀 수를 보이는 값인 5,000 을 이용하였으나,[10] 셀 크기는 기본적으로 반

응 속도 상수 k 값에 의존하므로 1,000~10,000 범위에서의 의존성을 부수적으로 살펴보았다.

해석의 초기 조건으로는 이전의 연구에서와 같이 1차원 ZND 해석의 결과로 얻어진 정상상태 해를 반경 방향으로 구배를 주어 분포시킴으로써 강제적으로 불안정성을 유발시키는 방법을 택하였다.[10] 단 이전의 파면 부착 좌표계와 달리 공간 고정 좌표계를 이용함으로써 변수 값의 초기화에는 좌표 변환을 필요로 한다. 환형 관의 안쪽 벽 및 바깥쪽 벽에는 비부착 경계조건을 조건을 이용하였다. MW의 입구 조건은 초기 값을, 출구에서는 C-J 압력을 이용한 특성치 초건을 이용하였다.

한편 파면 구조의 시간에 따른 변화를 보여주는 수치적 그을음 막 기록(smoked-foil record)는 모든 격자 위치에서 모든 시간에 대한 최대 압력을 기록함으로써 이전에 파면 부착 좌표계를 이용하는 것에 비하여 편리하게 구할 수 있었다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 환형 관내의 데토네이션 셀 구조

곡률 반경의 변화에 따른 데토네이션 셀 구조의 의존성을 살피기 위하여 반응 속도 상수 k=1,000, 2,000, 5,000 및 10,000 인 각 조건에서 곡률 반경, R이 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5 및 9.0 인 경우에 대하여 해석을 진행하였다. 곡률 반경은 그래픽의 편의성을 위하여 선정하였다. 각 반응 속도의 경우에 여러 곡률 반경에 대한 수치적 그을음 막 기록을 Fig.3에 도시하였다. 수치적 그을음 막 기록은 각 격자점에서 전체 시간 중의 최대 압력을 기록한 것으로써, 데토네이션 파면 구조의 시간 변화 기록을 나타낸다.

k=1,000 인 경우의 해는 곡률 반경의 크기에 관계없이 셀 구조가 형성되지 않은 결과를 보여주며, 곡률 반경이 큰 경우에 다소의 불규칙성이 나타난다. 그러나 k=2,000 인 경우, 다소의 불규칙성이 있지만 곡률 반경이 큰 경우에 데토네이션 셀 구조가 형성되는 것을 알 수 있다. k=5,000 및 10,000 인 경우에는 관 단 면에서 셀의 숫자는 반응 속도 상수에 비례하여 늘어나는 것을 볼 수 있으며, 약한 불안정성을 가진 경우이므로 셀 구조는 매우 균일하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 직선 관에서도 반응 속도 상수가 작은 경우에 나타나는 일반적인 경향으로써, 셀의 숫자도 직선 관과 유사하며 구부러진 환형 관이라는 것 이외에는 큰 차이가 없다.

환형 관이라는 기하학적 특징의 영향은 곡률 반경의 크기가 작을 때 두드러지게 나타난다. Fig. 4는 직선 관과의 보다 명확한 비교를 위하여 k=2,000 및 5,000 인 경우에 대하여 그을음 막 기록을 직선으로 펼쳐 그린 확대 그림이다. 곡률 반경 R=1.5 인 경우에는 반응 속도 상수 k에 관계없이, k=1,000 인 경우의 결과처럼 셀 구조가 형성되지 않는 것을 알 수 있다. R=3.0 인 경우에는 다소 불안정한 경향을 보이기도 하지만 궁극적으로는 셀 구조가 형성되지 않는 것으로 보인다. R=4.5 인 경우에도 역시 초기에 다소 불안정한 경향을 보이기도 하지만 최종적으로는 모든 경우에 셀 구조가 형성되었으며, 이보다 곡

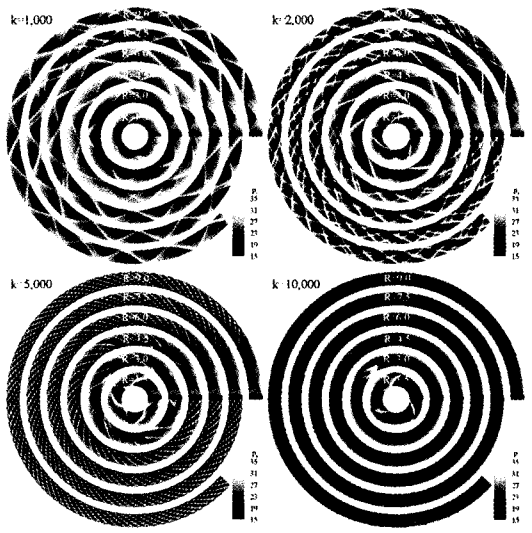


Fig. 3 Numerical smoked-foil record showing the dependency of detonation cell structures on the radius of curvature for different pre-exponential factor, k.

률 반경이 큰 경우에는 모두 규칙적인 셀 구조가 포착 되었다. 따라서 환형 관내에서 데토네이션 셀 구조의 형성은 셀 구조의 형성 여부를 결정하는 임계 곡률 반경이 있는 것으로 보인다. 아울러 반응속도 상수, k 에 관계없이 데토네이션 셀 구조가 형성되는 최소의 곡률 반경은 R=4.5 인 것으로 나타나, 이 값 보다 작은 임계 곡률 반경이 존재하는 것으로 여겨진다.

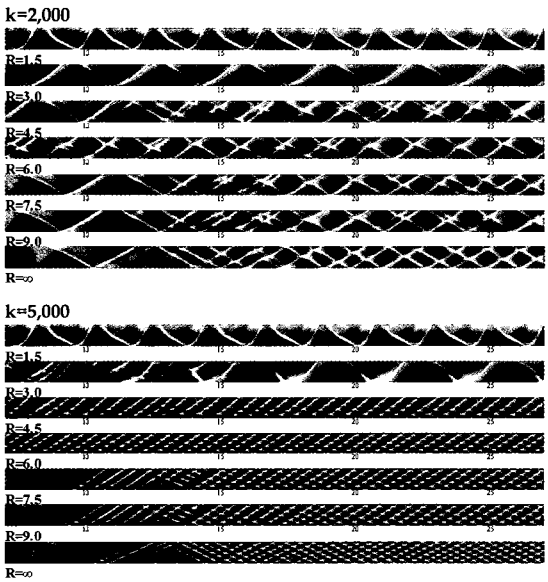


Fig. 4 Linearized plots of numerical smoked-foil records for k=2,000 and 5,000

3.2 데토네이션 파면 구조

곡률 반경이 데토네이션 파면 구조에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 반응 속도 상수 k=5,000 인 경우 곡률 반경의 변화에 따른 데토네이션 파면의 순간 압력 분포와 생성물의 질량 분율을 Fig. 5에 도시하였다. 4~5개의 셀 구조가 나타났던 이전의 직선 관에 대한 결과와 비교할 때 [10], 곡선 관의 결과는 셀 구조가 다소 불규칙한 양상을 보이지만 곡률 반경이 커질수록 규칙성 및 셀 구조의 수가 직선 관에 근접하여 가는 추론 가능한 결과를 보인다. 여기서 특기 사항은 앞에서 언급한 바와 같이 곡률 반경 R=4.5 이상인 경우에는 여러 개의 삼중점이 나타나는 전형적인 셀 구조를 보이지만, 곡률 반경 R=1.5와 3.0인 경우에는 데토네이션 셀 구조가 나타나지 않고 삼중점이 하나만 관찰된다는 점이며, 이는 데토네이션 셀 구조 유지를 위하여 필수적인 파면 후방의 C-J 조건이 곡률 반경이 작은 경우에는 만족되고 있지 않음을 의미한다.

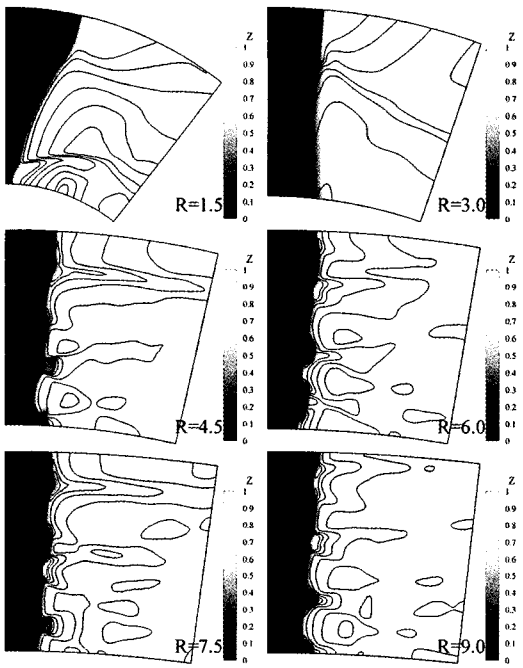
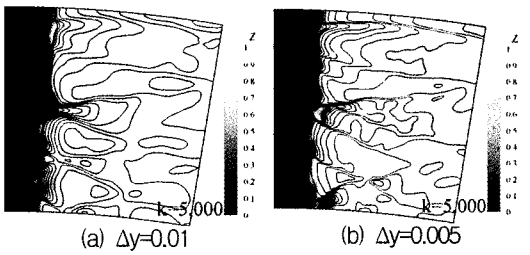


Fig. 5 Overlaid pressure and mass fraction contours showing the wave front structures of weakly unstable detonation wave for the case of k=5,000

3.3 격자 해상도의 차이에 의한 영향

데토네이션 파 셀 구조 해석과 같은 반응 유동의 해석은 반응 영역의 해상도에 의하여 결과에 차이가 발생할 수 있으므로, 격자 의존도에 대한 점검이 필요하다. 이를 위하여 R=6.0인 경우에 대한 해석을 Δy=0.005인 격자 해상도를 이용하여 추가로 수행하여 비교하여 보았다. 1차원적 격자 해상도가 2배 증가할 경우, 동일한 CFL 안정 조건을 적용하면 시간 간격이 절반으로 줄어듦으로 2차원 해석의 계산 시간은 8배 증가한다. Fig. 6은 각 격자를 이용한 파면 구조를 나타낸 그림으로써, 거의 같은 시점을 선택하였을 때, 해상도의 차이에 의한 구배의 차이가 나

타나기는 하지만, 파면을 형성하는 횡단 파 등의 존재에 있어 물리적인 차이는 보이지 않는다. Fig. 7은 수치적 그을음 막 기록을 비교한 그림으로써, 해상도에 따른 차이가 다소 나타나기는 하지만, 셀의 크기 및 반응 속도 의존 경향 등에 있어 근본적인 차이는 없는 것으로 보인다. 따라서 본 연구에 주로 이용한 Δy=0.01 의 격자 해상도는 곡률 반경의 영향을 살피는데 있어 물리적인 오류를 발생하지는 않는 정도에서 효율적인 해석을 가능하게 하는 것으로 판단된다.



(a) Δy=0.01 (b) Δy=0.005

Fig. 6 Comparison of wave front structures using grid resolutions Δy=0.01 and Δy=0.005

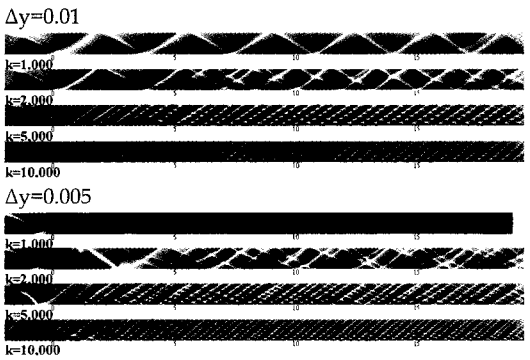


Fig. 7 Numerical smoked-foil records with Δy=0.01 and Δy=0.005 for R=6.0

4. 데토네이션 파의 관내 전파 특성

4.1 데토네이션 파면 전파 특성

데토네이션 셀 구조가 유지되는 경우 환형 관내의 데토네이션 파 전파 특성을 살피기 위하여, 관 내부 중심선에서의 von Neumann 최고 압력 (peak pressure) 및 데토네이션 파의 전파 속도를 살펴보았다. Fig. 8은 k=5,000, R=6.0 인 경우의 von Neumann 최고 압력 및 수치 모사 결과 데토네이션 파의 속도와 C-J 데토네이션 파의 속도의 차이를 수치적 계산 값으로부터 산출하여 도시한 그림이다. von Neumann 최고 압력은 압력의 최고 구배를 이용한 충격파 포착(sensing)을 통하여 직후방의 압력을 추적하여 얻었다. 데토네이션 파의 속도는 충격파 포착을 통한 충격파 위치 추적의 결과로부터 수치적 도함수 값을 이용하여 바로 계산 할 경우 심각한 수치적 진동을 가져오므로, moving window averaging 방법을 사용하여[13] 전후 각각 50개의 데이터를 이용하여 smoothing 한 결과이다.

이 그림에서 중심선에서의 압력 파형과 데토네이션 파의 속도는 잘 일치하고 있다. 압력 파형은 정상상태 ZND 해석을 통하여 얻은 von Neumann 최고 압력 39.16 전후로 진동하고 있으며, 데토네이션 파의 속도가 C-J 속도 부근에서 진동하고 있어, 환형 관내에서도 셀 구조를 가지는 데토네이션파의 전파 속도는 C-J 속도로 전파함을 확인할 수 있다.

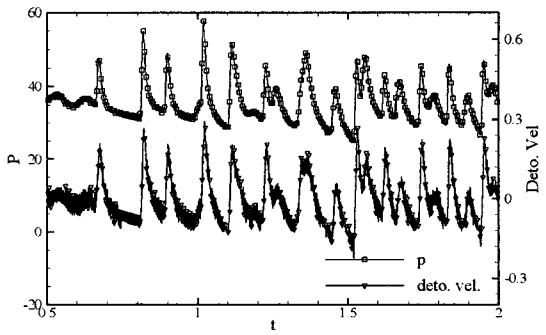


Fig. 8 Time histories von Neumann peak pressure and $D-D_{C-J}$ at centerline

4.2 벽면 최대 압력 특성

환형 관내를 전파하는 데토네이션파의 또 다른 특징 가운데 하나는 곡률 반경의 중심 방향(안쪽) 과 바깥쪽의 압력의 차이이다. 이는 Fig. 3 및 4에서 흑백 단조 변화로 나타난 압력의 수

준으로도 알 수 있다. 보다 정량적인 비교를 위하여 k=5,000, R=6.0 인 경우 관 내부의 안쪽 내벽, 중심선 및 외벽을 따른 최고 압력 변화를 Fig. 9에 도시하였다. 주기적 변화 양상을 보이는 압력 변화는 내벽에 비하여 외벽에서 더 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 환형 관 내부에서 데토네이션파의 전파 속도가 C-J 데토네이션 파의 속도를 유지함을 보인 위의 결과를 참고할 때, 관의 바깥쪽에서는 C-J 조건보다 가속된 조건인 ovedriven 데토네이션의 특징을 가지며, 안쪽에서는 underdriven 데토네이션의 상태로 진행함을 의미한다.

관의 곡률 반경에 따른 압력 변화 특징을 살펴보기 위하여 관 계산을 수행한 곡률 반경들에 대한 외벽에서의 압력 변화를 Fig.10 에 함께 도시하였다. 이 그림에서 곡률 반경이 큰 경우에는 압력 변화 양상이 큰 차이를 보이지 않으며, 점차 같은 수준으로 접근하지만, 곡률 반경이 작은 경우에는 압력의 크기와 주기가 모두 심하게 차

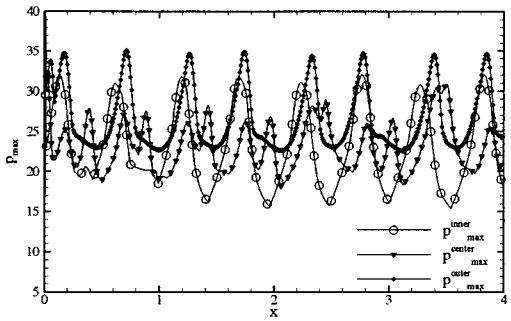


Fig. 9 Maximum pressure variation along the inner surface, centerline and outer surface for the case of k=5,000 and R=6.0

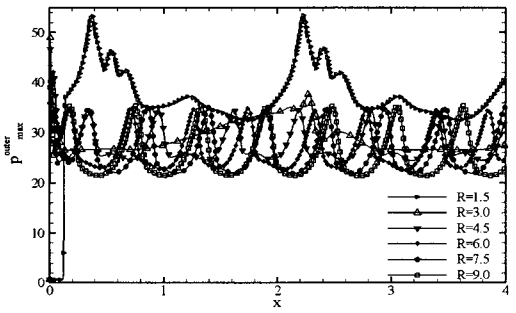


Fig. 10 Maximum pressure variations along the outer surfaces of annular channels of different radius of curvature for the case of k=5,000

이가 나고 있음을 알 수 있다 특히 곡률 반경이 R=1.5인 경우에는 압력 수준이 매우 크게 나타나며, C-J 조건의 압력 수준과 비교하였을 때 심한 overdriven 조건에서 매우 불안정한 데토네이션 파 진행 양상을 보임을 알 수 있다.

4.3 곡률 반경이 환형 관내 압력에 미치는 영향

곡률 반경의 변화가 최대 압력에 미치는 영향을 종합적으로 살펴보기 위하여 각 경우의 외벽, 중심선 및 내벽에서의 최대 압력을 길이 방향에 대하여 평균을 구하여 Fig. 11에 도시하였다. 이 그림에서는 앞 절에의 결과에서 반지름이 커지면서 압력이 수렴해가는 경향성을 좀 더 명확히 알 수 있다. 곡률 반경이 작은 경우에는 데토네이션 파가 불안정하며 내,외부 압력 차이가 크게 나타나지만, 곡률 반경 커지면서 직선 관의 결과로 수렴하는 것으로 보인다.

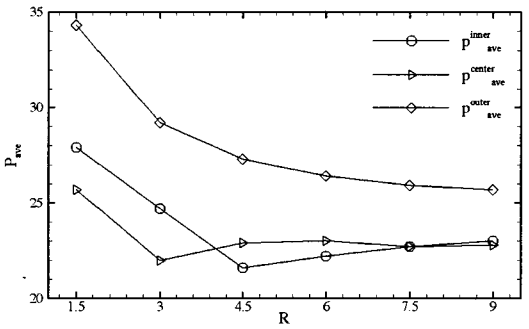


Fig. 11 Mean pressure variation along the outer surface, centerline and inner surface

5. 결 론

본 논문에서는 데토네이션을 이용한 추진 기관의 요소인 환형 관에서의 데토네이션 파의 전파 특성을 살펴보았다. 관 폭의 값으로 무차원화된 곡률 반경을 유일한 기하학적 변수로 고려하여 일련의 해석을 수행하여 몇 가지 흥미로운 결과를 얻을 수 있었다. 곡률 반경이 작은 환형 관에서 데토네이션 파는 불안정하여 정규적인 데토네이션 셀 구조가 나타나지 않으며 셀 구조가 유지될 수 있는 임계 곡률 반경이 존재함을

알 수 있었다. 환형 관내에서 관의 내벽 및 외벽에는 곡률 반경이 작을수록 큰 압력차가 발생하며 외벽 쪽에서 데토네이션 파는 overdriven 경향을 가진다. 곡률 반경이 커질수록 직선 관의 결과에 근접하게 수렴한다. 곡률 반경이 데토네이션 파의 전파에 미치는 이상의 특징들에 대한 유체역학적인 이유에 대해서는 추가적인 관찰 및 분석이 필요하다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원과 국방과학연구소 고에너지 물질 특화연구센터의 HM-22 과제 지원에 의하여 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Frolov, S. M., Aksenov, V. S., and Shamshin, I.O., "Shock wave and detonation propagation through U-bend tubes," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, No. 2, 2007, pp.2421-2428
2. Frolov, S. M., and Aksenov, V. S., "Deflagration-to-Detonation Transition in Kerosene Air Mixtures," 21st ICDERS, July 23-27, 2007, Poitiers
3. Nicholls, J. A., Dabora, E. K., and Gealler,R. A., "Studies in Connection with stabilized Gaseous Detonations waves" Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 11, 1959, pp. 766-772
4. Nicholls, J. A., Cullen, R. E. and Raglano, K. W., "Feasibility Studies of a Rotating Detonation Wave Rocket Motor," Journal of Spacecraft, Vol. 3, No. 6, 1966, pp.893-898
5. Voitsekhovskii, B. V., Mitrofanov V. V., and Topchiyan, M. E., "Structure of a Detonation Front in Gases," Siberian Branch of the USSR Academy of Science, Novosibirsk, Russia, 1963, pp.1-168
6. Voitsekhovskii, B. V., ""Stationary Spin Detonation,"" Soviet Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, No. 3, 1960, pp.157-164
7. Daniau, E., Falempin, F., Bykovskii, F. A., and Zhdan, S., "Pulsed and Rotating Detonation Propulsion System: First Step Toward Operational Engines," AIAA 2005-3233
8. Daniau, E., Falempin, F., Getin, N., Bykovskii, F. A., and Zhdan, S., "Design of a Continuous Detonation Wave Engine for Space Application," AIAA 2006-4794, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 9-12 July 2006, Sacramento, California
9. Milanowski, K., Kindracki, J., Kobiera, A., Wolanski, P., and Fujiwara, T., "Numerical Simulation of Rotating Detonation in Cylindrical Channel," 21st ICDERS, July 23-27, 2007, Poitiers
10. 최정열, 조덕래, "데토네이션 셀 구조 모사를 위한 수치적 요구 조건," 한국추진공학회지, 제10권 제2호, 2006, pp.1-14
11. 조덕래, 원수희, 신재렬, 이수한, 최정열, "정사각관 내 데토네이션 파 구조의 삼차원 수치 해석," 한국추진공학회지, 제11권 제1호, 2007년, pp.1-10
12. Parent, B. and Sislian, J. P. "The Use of Domain Decomposition in Accelerating the Convergence of Quasi-hyperbolic Systems," Journal of Computational Physics, Vol. 179, No. 1, 2002, pp.140-169
13. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., "14.8 Savitzky-Golay Smoothing Filter", Numerical Recipes in Fortran 77, 2nd Ed., Cambridge University Press, 1992, pp.644-649