

# TBCC를 위한 CVC 엔진의 데토네이션 현상 기초 연구

최정열\* · Bernard Parent \* · 조덕래\*\* · 강기하\*\* · 신재렬\*\* · 이수한\*\* · 이태형\*\*\*

## Detonation Wave Studies for CVC Engines of TBCC

J.-Y. Choi\* · B. Parent\* · D.-R. Cho\*\* · K. Kang\*\* · J.-R. Shin\*\* · S.-H. Lee\*\* · T.-H. Yi\*\*\*

### ABSTRACT

DARPA's hypersonic propulsion program VULCAN is aimed for development of Mach 4+ capable engine by combining current production turbofan engine such as F119 with CVC (Constant Volume Combustion) engine. Final goal is a TBCC(Turbo-based Combined Cycle) engine by combining with dual mode ramjet/scramjet engine. CVC is a common designation of new concept of high efficiency engines, such as Pulse Detonation Engine (PDE) or Continuous Detonation Engine (CDE), which use the detonation as a combustion mechanism. Present paper introduces the internationally collaborative research activities carried out in Aerospace Combustion and Propulsion Laboratory of the department of Aerospace Engineering of the Pusan national University.

### 초 록

DARPA가 계획 중인 대형 극초음속 추진 기관 개발 프로그램 VULCAN 프로그램은 듀얼모드 램 제트/스크램제트 엔진과 연계되어 TBCC엔진을 이룰 수 있도록, 기존의 터보제트(또는 터보팬) 엔진 과 CVC와 엔진을 결합하여 마하수 4이상에서 작동 가능한 엔진을 개발하는 것을 목표로 하고 있다. CVC 엔진은 데토네이션 연소 현상을 기본으로 하여 고마하수에서 고효율을 얻을 수 있는 PDE 이나 CDE와 같은 신개념의 엔진이다. 본 논문에서는 부산대학교 항공우주공학과 연소 추진 연구실에서 지난 수년간 국제공동 연구의 형태로 수행한 데토네이션 현상의 추진기관 응용에 연구에 대하여 소개한다.

Key Words: TBCC, CVC, Detonation Waves, PDE, CDE

### 1. VULCAN 프로그램

2008년 6월 DARPA 는 VULCAN 엔진 개발 프로그램을 공고하였다. VULCAN 프로그램은 F119와 같은 기존의 터보 엔진을 기반으로 CVC (Constant Volume Combustion) 엔진을 부가하

여 마하수 4까지 비행 가능한 엔진을 개발하는 프로그램이다. VULCAN 프로그램 자체는 극초 음속 추진 기관 개발 프로그램이 아니며, 별도로 개발될 듀얼모드 램제트/스크램제트 엔진과 병 행하여 TBCC 엔진을 구성할 것이다.

따라서 HCV를 위한 TBCC 통합 체계는 기존 에 개발된 군용 터보 팬 엔진과 CVC 엔진을 결 합하여 마하수 4까지 이용 가능한 추진 기관과, 마하수 2.5부터 6 이상까지 작동 가능한 dual-mode 램제트/스크램제트 엔진을 병렬로 결합하 한 형태가 될 것으로 보인다. 이러한 형태의 엔

\* 부산대학교 항공우주공학과

\*\* 부산대학교 대학원 항공우주공학과

\*\*\* 싱가포르 과기연구국

연락처, E-mail: aerochoi@pusan.ac.kr

진 조합에 필요한 기술적 문제는 모두 해결 가능한 것으로 보이며, 이상으로 극초음속 장거리 비행을 위한 추진 체계 기술은 완성될 수 있는 것으로 보인다.

이러한 엔진을 구상하게 된 배경은 소형 비행체인 HTV-3X가 초음속 크루즈 미사일용 터보제트 엔진을 이용할 수 있는 반면, 대형 비행체인 HCV를 위하여 기반으로 이용할 수 있는 높은 초음속 영역까지 작동 가능한 대형 터보 제트 엔진은 존재하지 않는 상황이기 때문이다. 즉 높은 마하수에서 작동 가능한 터보 제트 엔진은 재료의 문제로 인하여 열차폐 및 냉각, 소재 등에서 기존의 엔진과는 다른 기술 수준을 요구하므로, 개발 및 생산 비용에서 비현실적이라는 판단으로 보인다.

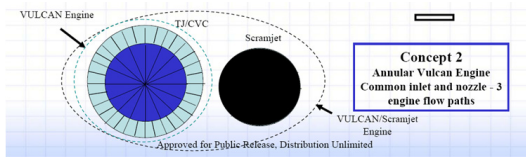


Fig. 1 VULCAN 엔진 통합 개념도

이러한 대안으로 지난 10년간 많은 연구가 진행된 PDE (Pulse Detonation Engine) 이나 최근 새로이 연구되고 있는 CDE (Pulse Detonation Engine) 등, CVC 사이클에 기반한 엔진을 기존의 터보제트와 결합한 형태의 복합 사이클 추진기관 개념을 고려하고 있다. 최근의 연구를 통하여 PDE 등 CVC 사이클 엔진은 높은 초음속 영역에서 램제트 엔진 보다 높은 비추력을 가지는 것으로 판단되며, 터빈과 같은 고온 회전 부품이 없기 때문에 높은 초음속에서의 작동에 문제가 없을 것으로 예상된다.

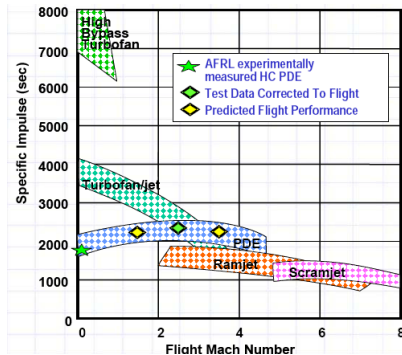


Fig. 2 Specific Impulse of PDE

## 2. 데토네이션 추진기관

데토네이션을 이용한 추진기관에 대한 연구는

지난 수십 년간 꾸준히 진행되어 왔으나, 최근 10년간 미국에서 PDE 연구 프로그램이 시작되면서 프랑스, 일본 등 세계 각지에서 많은 연구가 진행되었다. 데토네이션 추진기관의 가장 기본적인 장점은 기존의 터보 추진기관에 비하여 매우 간단한 구조를 가진다는 것이었으나, 최근에는 환경 문제 및 에너지 위기 및 등으로 인하여 기존의 Brayton 사이클에 비하여 효율 면에서 상당한 장점을 가지는 Humphrey 사이클을 구현 하는 방법으로써 데토네이션을 기본 연소 메커니즘으로 이용하는 엔진이 또 다른 관심을 얻고 있다.

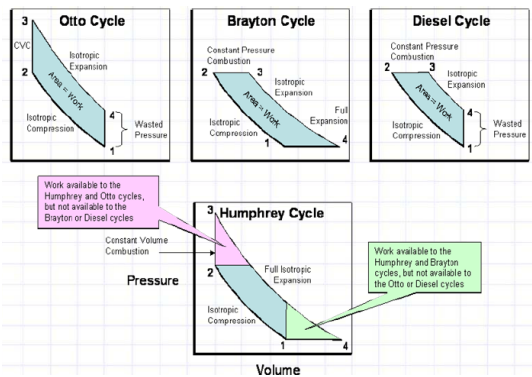


Fig. 3 Comparison of Humphrey Cycle with others

데토네이션을 이용한 추진 기관 연구는 PDE가 대표적이며 지난 10년간 PW, GE 등 대형 항공 엔진회사가 연구에 참여하면서 상당한 수준의 발전이 있었으며, 최근에는 PDE를 터보 엔진의 연소기, 후연기, 팬 후방 연소기 등으로 활용하는 다양한 형태의 응용이 연구되고 있으며, 기존의 정압 연소기를 대체하는 Detonation Wave Rotor 라는 또 다른 형태의 연소기 연구도 진행되고 있다. 한편 프랑스 등지에서는 MBDA의 주도로 기존의 로켓 및 공기흡입추진기관을 대신할 수 있는 CDE(또는 RDE)라는 새로운 개념의 데토네이션 추진기관을 연구하고 있으며, 실험 실 수준의 연구에서 개념 및 성능 검증을 완료하고 실용 시스템에 응용을 목표로 연구를 진행하고 있다. CDE는 PDE에 비하여 더욱 간단한 구조를 가지고 연속적으로 작동할 수 있다는 장점을 가지고 있기에 기존의 터보 기관과 복합사이클을 구성하기에 훨씬 수월할 것으로 여겨지기 때문에 냉각 문제만 해결한다면 이용 가능성이 높을 것으로 고려된다. DARPA에서도 이러한 이유로 기존에 미국에서 연구가 거의 수행된 바 없는 CDE를 VULCAN 프로그램의 후보로써 고려하고 있는 것으로 여겨진다.



Fig. 4 PW사의 PDE 시연 장면

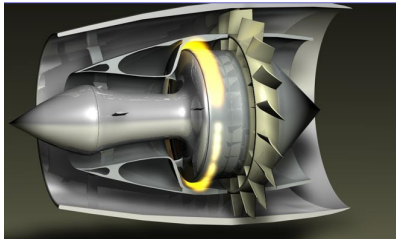


Fig. 5 Cut-way Image of Air-breathing RDE Concept

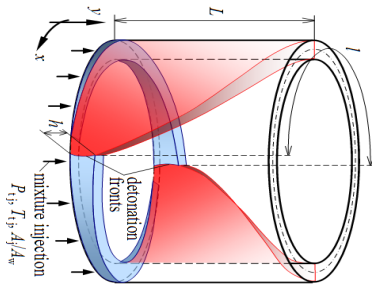


Fig. 6 Operation concept of CDE combustor

### 3. 부산대 항공우주공학과와의 데토네이션 연구 활동

부산대학교 항공우주공학과에서는 지난 10년간 추진기관 응용을 목적으로 데토네이션 현상에 대한 기초연구를 수행하였다. 본 연구팀의 연구는 실험적으로 관찰이나 측정, 또는 연구 방향 설정이 어려운 주제에 대하여 본 연구팀의 국제적으로 기술적 우위를 가지는 전산유체 해석 기법을 이용하여 진행되었다.

첫 번째 연구는 미국 해군의 지원으로 펜실바니아 주립대 V.Yang 교수팀에 참여하여 수행된 PDE 성능 해석 연구로써, 이 연구에서는 1) 밸브 및 공급 시점의 조절에 따른 PDE 성능 최적화, 2) 노즐의 형태 및 부착 여부에 따른 성능 향상 가능성, 3) Multi-tube 구성에 따른 성능 향상 여부 및 진동 문제 파악 등이 연구되었다. Fig. 7은 multi-tube PDE의 비정상 CFD 해석 결과이다.

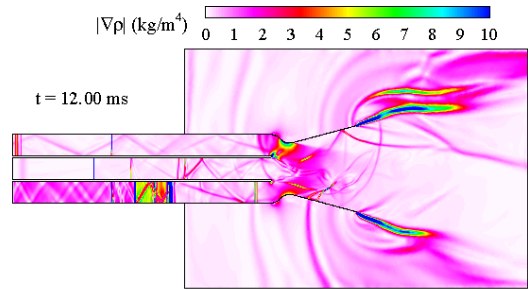


Fig. 7 Multi-tube PDE의 비정상 CFD 해석

두 번째 연구는 기존 PDE에서 시스템을 복잡하게 하는 중요한 하위계통인 밸브를 공기역학적 시스템으로 대체하는 개념인 valveless PDE에 대한 연구로써, 이 연구에서는 보다 정확한 열화학적 모델링을 이용하여 이전에 충분히 알려지지 않았던 비정상 내부 유동 및 작동 특성을 규명하였고, 타이밍 조절에 따른 성능 최적화가 연구되었다. Fig. 8은 valveless PDE의 비정상 해석에 의한 내부 압력 분포이다.

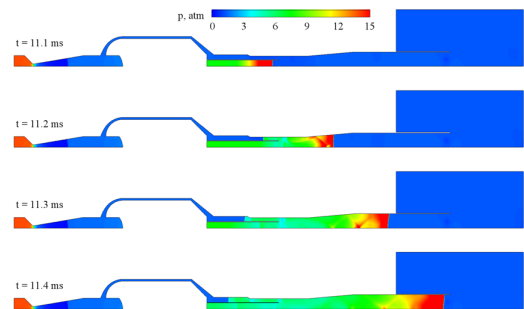


Fig. 8 Valveless PDE의 비정상 CFD 해석

한편 전체 추진기관 시스템에 대한 연구는 작동 기구 규명 및 성능 최적화 등에는 유용하였지만, 시스템의 작동 한계 조건에서 나타날 수 있는 불안정성 등은 규명할 수 없는 한계가 있었다. 이에 따라 데토네이션 파의 불안정 특성을 규명할 수 있는 셀 구조 파악에 대한 기초 연구를 진행하였으며, 2차원 해석 연구를 시작으로 3차원 사각 관 및 보다 실질적인 형태인 원형 관에서의 데토네이션 파면 구조 해석 및 안정성에 대한 연구를 진행하였다. Fig. 9는 약간, 중간 그리고 강한 불안정을 가지는 데토네이션 파의 구조를 살펴본 이차원 해석의 예이고, Fig. 10은 삼차원 사각 관에서의 데토네이션 파의 파면 구조 및 수치적 smoked foil record를 보여준다.

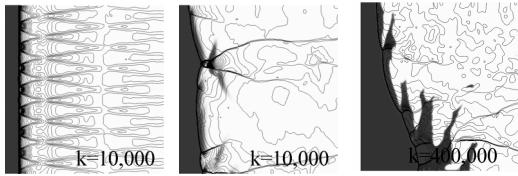


Fig. 9 Structures of weakly, moderately and highly unstable detonation waves

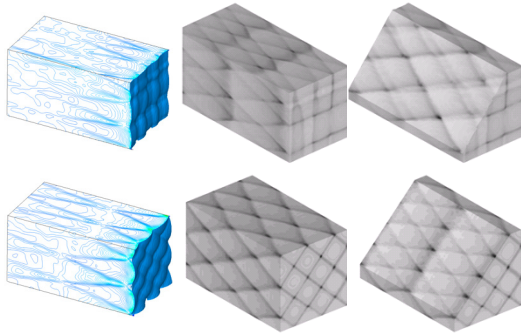


Fig. 10 Detonation wave structures and numerical smoked foil records in a square duct

Figure 11은 PDE 엔진 등의 보다 실질적인 형태인 원형 관에서의 데토네이션 파 구조 및 동적 특성을 보여주는 그림으로써, 이 연구를 통하여 원형관 내에서 이전에 정확히 알려진 바가 없던 데토네이션 셀 생성 메커니즘 및 셀의 형태 등을 이해할 수 있었다.

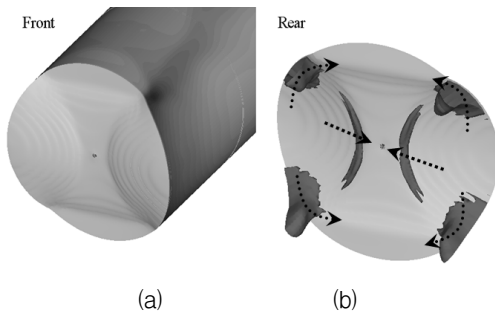


Fig. 11 Two-cell mode detonation wave structures in a circular duct

최근에는 CDE와 관련된 기초 연구를 수행하였으며, 그 첫째는 환형 관내에서 전파 되는 데토네이션파의 안정성에 관한 연구로써, 이 연구로부터

관의 곡률 반경이 작은 경우에는 데토네이션파가 안정된 셀 구조를 가지지 못함을 규명하였다.(Fig. 12 참조) 최근에는 싱가포르 파기연구국 고성능계산연구원과 공동으로 CDE의 작동 특성 파악을 위한 전산 연구를 시작하였으며 Fig. 13은 CDE 내에서 데토네이션 파 전파를 보여주는 순간 압력 분포도 이다.

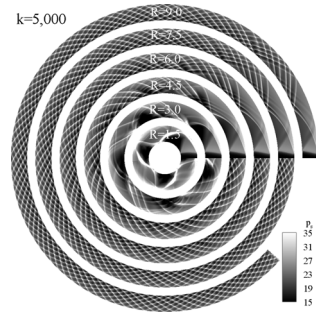


Fig. 12 Numerical smoked-foil record showing the dependency of detonation cell structures on the radius of curvature

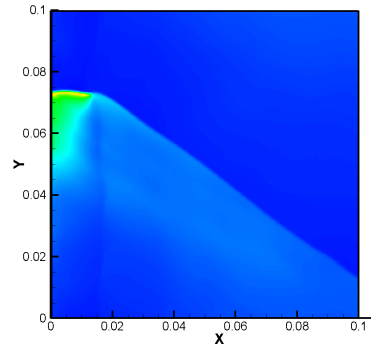


Fig. 13 Snapshot of pressure distribution in a CDE

### 참고 문헌

1. Bussing, T., "VULCAN Overview," VULCAN Industry Day Agenda, June 10 2008.
2. Ma, F., Choi, J.-Y., and Yang, V., "Internal Flow Dynamics in a Valveless Airbreathing Pulse Detonation Combustor Facility," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.24, No.3, May-June 2008, pp. 479-490.