

# 일체형 로켓 램제트의 비정상 반응유동장 해석

고 현<sup>†</sup> · 박 병훈\* · 윤 응섭\*\*

Analysis on the Unsteady Reacting Flow-field in Integrated Rocket Ramjet

Hyun Ko, Byung-Hun Park and Woong-Sup Yoon

**Key Words :** Ramjet(램제트), IRR(일체형 로켓 램제트), Transition(천이과정), Buzz(버즈)

## Abstract

Transition sequence of rocket to ramjet was simulated numerically for a two-dimensional axis-symmetric can-type ramjet engine. Multi-species preconditioned Navier-Stokes equations with  $k-\epsilon$  turbulence model and finite-rate chemistry model was employed. To calculate transition sequence, initial flow-field conditions for inlet diffuser with closed port-cover was computed first, and then that result was applied as initial conditions after port-cover opened. Terminal shock was developed as a result of increased pressure in a combustor due to combustion and ramjet operated at supercritical condition. For a smaller nozzle throat area, buzz instability was occurred. Strong pressure oscillations were observed as a result of forward and backward movement of terminal shock and those oscillations were not damped out.

## 1. 서 론

램제트 추진기관은 터보제트엔진 보다 높은 마하수에서 작동 가능하고, 로켓엔진에 비해 높은 비추력을 갖기 때문에 초음속 장거리 비행에 유리하며 사거리가 길고, 목표물 타격 시 높은 명중률과 낮은 격추율을 갖는 효과적인 추진시스템이다. 램제트 추진기관은 다른 추진기관에 비하여 전략적인 미사일로서 여러 가지 장점을 가진다. 우선 미사일이 고속으로 비행하기 때문에 목표물을 타격하는 속도가 빠르고 이로 인해 더 큰 에너지로 목표물을 공격할 수 있으며, 고속 비행으로 인하여 적의 레이더에 감지되는 시간이 짧기 때문에 격추될 우려가 적다. 또한 사거리가 길기 때문에 공격가능 범위가 넓고, 동일한 사거리와 탄두를 가지는 경우 다른 추진기관을 장착한 미사일보다

크기가 작다. 따라서 미사일의 운반이 용이하고 더 많은 미사일을 운반할 수 있으며, 보다 큰 탄두를 장착할 수 있으며 지속적인 성능향상이 가능하다.

램제트 엔진은 초음속 유동에서 충격파를 통한 압력상승을 이용하여 공기를 압축하기 때문에, 마하수 2 이상의 초음속이어야 한다. 하지만 순수한 램제트 엔진 만으로는 정지상태에서의 추력을 얻을 수 없기 때문에 로켓 부스터 등과 같은 보조적인 추진 수단이 필요하다. 부스터를 이용하는 방식 중에서 일체형 로켓 램제트(Integrated Rocket Ramjet) 엔진은 부스터 상태와 램제트 상태에서 연소실을 공유하는 방식으로, 부스터 말기에서 램제트 모드로의 전환 과정에서 흡입구 포트커버(port-cover)의 개방, 출구노즐의 배출, 연료분사, 점화 등 일련의 과정이 300ms 정도의 짧은 시간 안에 일어나는 천이과정을 수반한다[1,2].

본 논문에서는 일체형 램제트엔진의 천이과정의 전산모사를 위한 수치해석 프로그램을 작성하였다. 천이과정의 해석을 위해 비정상 압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였고, 저 레이놀즈 수 난류 모델, 유한반응률 화학반응 모델을 적용하였다. 램

<sup>†</sup> 연세대학교 대학원 기계공학과

E-mail : wizzard@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4812 FAX : (02)312-2159

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\* 연세대학교 기계공학과

제트 천이과정에서 유동장내에 낮은 마하수 유동 영역에서부터 초음속 유동영역이 혼재되어 나타나기 때문에, 유동장의 속도 스케일의 범위가 넓어 시간전진기법을 적용하는 경우 낮은 마하수 영역에서 수렴특성이 저하된다[2,4]. 이를 위해, 지배방정식을 예조건화 하였으며, 충격파와 같이 불연속면에서 해의 진동을 억제하기 위해 TVD 기법을 적용하였다. 비정상 해석을 위해서는 이중시간전진기법을 적용하였으며, 대용량 계산을 위해 작성된 코드를 MPI 를 이용해 병렬화하였다. 2차원 축대칭 형상의 램제트 엔진에 대해 흡입구 port-cover 가 닫혀있는 상태에서 흡입구의 유동장에 대한 비정상 유동 해석을 수행하였다. 이 결과를 초기조건으로하여 port-cover 가 열린 상태에서 연료를 분사하여 흡입구 유동장이 연소실로 유입되는 현상과 아음속 연소환경의 형성과정에 대한 비정상상태 반응 유동장 해석을 수행하였다.

## 2. 수치 기법

본 연구에서 고려한 램제트 엔진은 축대칭 형상이기 때문에 다조성 물질에 대한 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 적용하였다. 난류모델로는 Yang & Shih [5]에 의해 제안된 저 레이놀즈수  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 낮은 마하수에서 시간전진기법의 수렴가속을 위해 예조건화 기법을 적용하였다[2,4]. 시간적분을 위해 LU 근사 인자분해 기법을 적용하여 대수 방정식을 블록-대각 행렬로 변환하여 시간적분을 수행하는 LU-SSOR (Lower-Upper Symmetric Successive Over Relaxation) 기법을 적용하였다. 이때, 유속 자코비안은 예조건화 행렬을 고려하여 분할 하였다[6].

공간에 대한 차분을 위해 유속차이분할(FDS) 기법을 이용하였고, 충격파와 같은 강한 불연속면에서 해의 진동을 억제하기 위해 Chakravarthy 과 Osher[6]에 의해 제안된 TVD 를 적용하여 고차의 공간정확도를 구현하였다. 예조건화된 지배방정식에 대한 수치적인 유속의 정확한 계산을 위해, Yang [6]등이 제안한 수정 방법을 적용하여, 3차의 공간 정확도를 갖도록 하였으며, 점성항은 일반적인 중심차분법을 적용하였고, 이중시간전진기법(Dual-time stepping method)을 적용하여, 내부 반복계산에서는 예조건화 기법을 통해 계산하고, 물리적 시간에 대하여 시간전진하도록 하였다. 이때, 물리적 시간항은 2차 정확도를 갖도록 차분하였다.

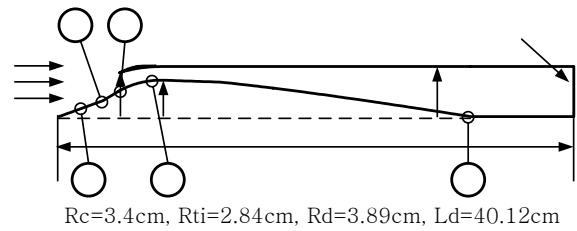


Fig. 1 Ramjet diffuser configuration

## 3. 계산 결과

램제트 천이과정에서 부스터 말기에 inlet cap 이 배출되고 포트커버가 닫힌 상태에서 흡입구로의 공기 유입에 의해 압력이 상승하고, 흡입구와 연소실의 압력차이에 의해 포트커버가 열려 흡입구의 고압, 저속의 유동이 연소실로 유입된다. 천이과정의 수치적인 계산을 위해서는 포트커버가 닫힌 상태에서 흡입구 유동장에 대한 정보가 필요하기 때문에, 본 연구에서는 Fig. 1 과 같은 램제트 흡입구에 대해 포트커버가 닫힌 상태의 유동장 계산을 수행하였다.

### 3.1 포트커버가 닫힌 상태의 흡입구 유동장

흡입구 작동 조건은 입구 마하수 2.1, 고도 2.5km 에서의 온도와 압력 271.91K, 0.74atm 으로 설정하였다. 포트커버가 닫힌 상태에서 흡입구에서는 궁형충격파가 발생되어 전방으로 진행하며, 이에 따른 팽창파는 하류쪽으로 진행된다. 하류에서 반사된 팽창파는 궁형충격파와 간섭하여 궁형충격파는 방향을 바꾸어 하류로 진행하고, 이때 발생한 압축파가 다시 포트커버에서 반사되어 궁형충격파를 전방으로 밀어내는 현상을 반복하게 된다[3]. 초기조건으로는 카울 후방에서 속도를 0 으로 하고 온도와 압력은 전온도, 전압력 조건으로 설정하였고, 물리적인 시간 간격은  $10 \mu\text{sec}$  으로 하였다.

Fig. 2 는 Fig. 1 의 램제트 흡입구의 ㉠,㉡,㉢ 위치에서 벽면 압력의 시간적인 변화를 보여준다. 각각의 위치에서 동일한 주파수의 압력진동을 보이며, ㉠ 위치에서는 카울 전방의 궁형충격파가 주기적으로 위치를 바꾸는 것을 볼 수 있다. 디퓨저의 전 영역에서 200Hz 의 주파수를 갖는 주기적인 유동 교란을 보인다.

Fig. 3 은 디퓨저의 중심체 끝단(㉣) 에서 시간진행에 따른 벽면 압력의 변화와 흡입구에서 공기의 유입질량 유량을 보여준다. 유입 질량 유량은 디퓨저 내부의 압력변화와 동일한 주파수를 갖고

진동한다. 디퓨저 내부의 압력은 3.5 ~ 7.5 기압 사이에서 진동하며, 디퓨저 내부의 압력이 최소가 되면 흡입구를 통해서 공기가 유입되고, 유입된 공기에 의해 램압력이 상승하여 최대가 되면 더 이상 흡입구를 통해 공기가 유입되지 못하고, 디퓨저 내부의 공기는 다시 입구를 통해 빠져나가고 압력은 내려가는 현상을 반복함을 볼 수 있다.

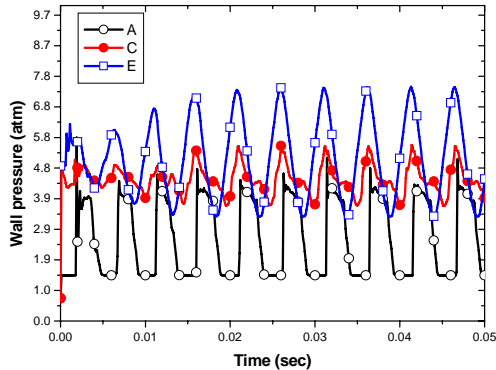


Fig. 2 Time trace of wall pressure at various diffuser locations

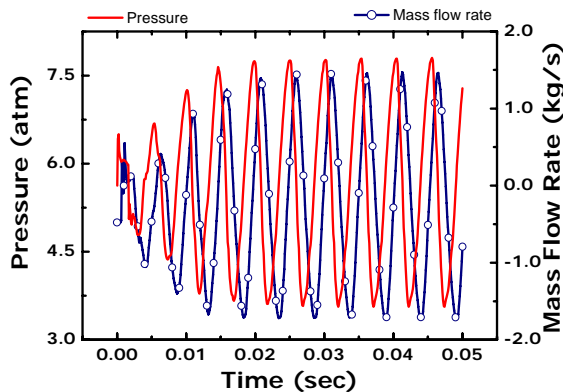


Fig. 3 Time trace of pressure(diffuser end) and mass flow rate (diffuser inlet)

3.2 램제트 천이과정의 해석

포트커버가 닫힌 상태에서 계산된 비정상 상태의 해를 초기조건으로 하여 포트커버 개방 후 흡입구와 연소실에 대한 반응 유동장을 계산하여 천이과정을 수치모사 하였다. 연소실에서는 부스터 말기의 유동조건으로 1400K, 3atm으로 가정하였고, 흡입구 유동장은 중심체 끝단에서 압력이 최대가 되는 시점으로 하였다. 포트커버 개방과 동시에 연소실 전방 4cm에서 당량비 0.8의 propane(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)을 분사하였고, 이 경우 특별한 점화과정 없이, 연소실의 초기 고온 영역에서 점화되었다. 계산에서 고려한 연소실의 반경은 7.786cm이고, 노즐을 포함한 연소실의 길이는 47.09cm, 노즐목의 반경은

4cm로 하였다.

포트커버 개방 후, 디퓨저에서 연소실로 초음속 상태로 유동이 유입되기 때문에 램제트의 작동을 위해서는 디퓨저에 종단충격파가 형성되어 연소실 내부에 아음속 유동환경이 형성되어야 한다. 하지만 종단충격파가 포트커버 개방 후 소멸되기 때문에 연소실에서 연료의 점화가 어렵게 되고, 화염의 flashback 현상이 야기될 수 있다. 다행히 포트커버 개방 후, 연소실 입구의 급확대 부분에서 재순환 유동장이 연료의 연소실 내부로의 퍼짐을 원활히 하고, 급확대 부에 잔류된 부스터 말기의 고온 가스가 점화의 에너지원으로 작동하여, 연소실에서의 아음속 반응 유동장의 형성에 도움이 된다.

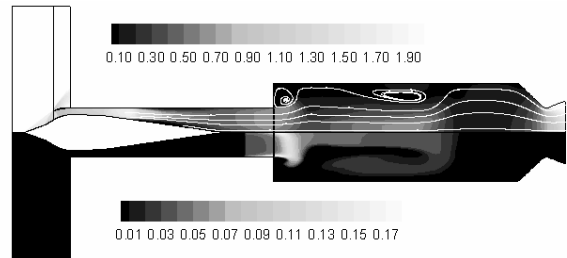


Fig. 4 Mach number(top) and fuel mass fraction (bottom) contour at 2 ms after port cover open

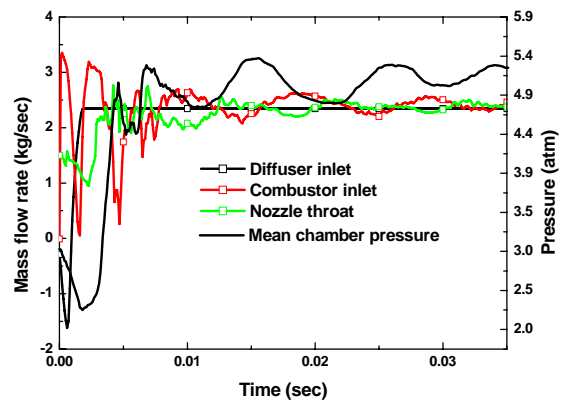


Fig. 5 Time trace of mass flow rate and mean chamber pressure

Fig. 4에서는 포트커버 개방 후 2ms에서의 마하수와 연료의 분포를 보여준다. 디퓨저 유동이 연소실로 유입되면서 급확대부에서 vortex roll-up에 의해 분사된 연료가 연소실 내부로 퍼지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 포트커버 개방 후 디퓨저 입구, 연소실 입구, 노즐목에서의 질량유량의 시간변화와 연소실 내부 평균 압력의 시간변화를 도시한 것이다. 디퓨저 입구에서는 초기의 spill-over 현상이 진행되다가 연소실로 유입되는 유량이 증가되면서 일정한 유량으로 수렴해가는 것을 볼 수 있다. 연소실 입구에서 질량유량은 포트커버의 개방 때문에

일시적으로 질량유량이 증가하지만, 디퓨저에서의 spill-over 에 의해 흡입구 내부에 충분한 공기가 없어서 유입질량은 다시 감소했다가, 흡입구의 spill-over 현상이 없어지면 유입질량이 다시 증가한다. 점화 후 연소실의 압력상승 때문에 다시 흡입구 유입질량은 감소하였다가, 연소실 압력 교란에 따라 유입질량유량 역시 진동하게 된다. 천이 과정 후에 램제트가 초임계 상태에서 작동하게 되므로 연소실 내부 압력교란에 영향을 받지 않고 흡입구에서의 공기 유입질량은 일정하게 유지되지만, 연소실과 노즐목을 통과하는 유량은 연소실 압력 교란의 영향을 받는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6 은 흡입구의 윗벽면과 중심체의 중간에서의 압력과 마하수의 변화를 도시한 것이다. 램제트 스파이크에서 발생하는 2 개의 경사충격파와 카울에서 반사된 경사충격파가 중심체에 입사되어 다시 반사되는 충격파열(shock train)이 종단충격파에 의해 종결되면서, 초음속 유동장이 아음속 유동장으로 변하는 것을 볼 수 있다. 종단충격파 이후에 연소실 입구에서의 압력은 5 기압 정도이고, 마하수는 0.4 정도로 연소실로 유입되고 있음을 볼 수 있다.

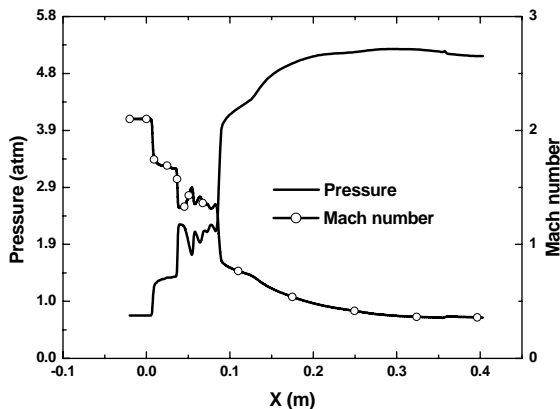


Fig. 6 Pressure and Mach number distribution along the center line at t=35 ms

### 3.3 버즈(Buzz) 불안정

연소실 내부에서 압력 진동이 특정한 한계를 넘어서 커지면, 디퓨저 내부의 종단 충격파는 입구목 하류에 위치할 수 없고, 흡입구 전방으로 이탈되어 공형 충격파를 형성한다. 이후 연소실로 유입되는 공기유량 감소로 연소실의 압력이 하강하고, 이에 따라 공형 충격파가 디퓨저 내부로 이동하여 종단충격파를 형성하게 된다. 이와 같은 현상이 반복되게 되면, 연소실 내부의 연소환경이 급격하게 변화하게 되는 연소 불안정 현상이 야기

되는 데, 이를 버즈(buzz) 현상이라 한다. 램제트 엔진이 버즈 상태에 이르게 되면 구조물에 심각한 손상이 유발될 수 있고, 흡입구의 작동 불능 상태를 야기할 수 있으므로, 램제트 개발 단계에서 반드시 고려되어야 할 사항이다.

3.2 절에서 고려한 램제트 연소실 형상에 대해, 노즐목의 반경을 3.91cm 로 줄여 계산한 결과, 50 ms 이후부터 흡입구에서 유동의 spill-over 현상이 발생하였고, 연소실의 압력은 심하게 진동하여 버즈(buzz)현상이 나타남을 볼 수 있었다.

Fig. 7 은 연소실의 평균압력의 시간변화를 도시한 것이다. 연소실 압력이 6 기압 정도까지 급격하게 상승하였다가, 4.5 기압 정도로 하강하는 현상을 반복적으로 보여준다. Fig. 8 은 각각 60, 65, 70, 75ms 에서 연소실 내부의 온도장 분포와 유선을 도시한 것이다. 버즈 상태에서 연소실 내부의 화염 면의 불규칙적인 왜곡이 나타나고, 또한 덤프면에서 발생하는 재순환 유동장의 변화도 관찰된다. Fig. 9 는 디퓨저의 입구와 연소실 입구에서 질량 유량의 시간변화를 도시한 것이다. 디퓨저 입구에서 유동의 spill-over 현상에 의해 유입질량 유량이 감소되었다가, 유동이 흡입구로 완전히 유입되면서 질량 유량이 일정하게 되는 현상을 반복하게 되고, 연소실 입구에서도 상당한 질량 유량의 변동이 나타난다. 연소실 입구의 질량 유량의 변화는 덤프면에서 발생하는 재순환 유동장으로 유입되는 연료의 양을 증가시키거나 감소시키게 되어, 연소실 전 영역에서 균일한 연소환경의 형성을 어렵게 한다. 그 결과, 연소실 내부의 비정상적인 압력의 교란이 지속적으로 유지되게 되어 연소 불안정 현상이 발생한다.

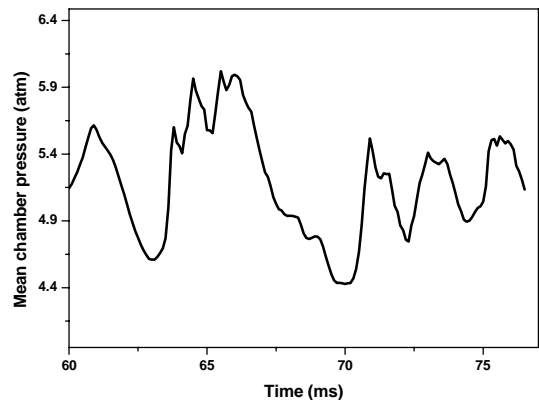
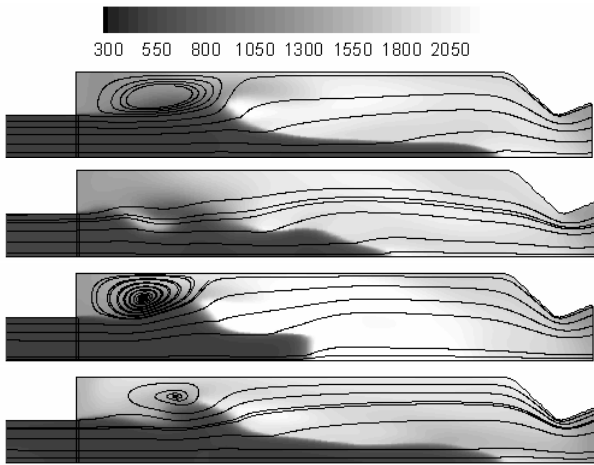
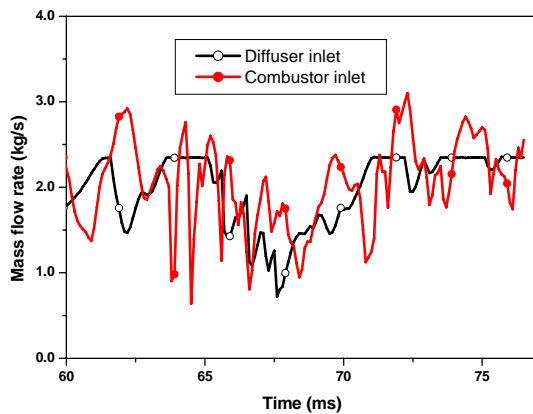


Fig. 7 Time trace of mean chamber pressure during buzz cycle



**Fig. 8** Temperature contours and streamlines (at 60ms, 65ms, 70ms, 75ms)



**Fig. 9** Time trace of mass flow rate at diffuser inlet and combustor inlet section

#### 4. 결론

램제트엔진의 천이과정을 포함하여 흡입구와 연소실에 대한 비정상 반응 유동장을 전산모사하였다. 포트커버가 닫혀있는 상태의 램제트 흡입구 유동장과 부스터 말기의 연소실의 환경을 초기조건으로하여 포트커버 개방 후의 램제트 흡입구 및 연소실의 반응 유동장을 비정상상태 해석을 통해 모사하였다. 포트커버 개방 전에 흡입구에서 카울 전방의 궁형 충격파는 일정한 주기를 가지고 움직이는 것을 알 수 있었고, 디퓨저 내부의 압력변화가 흡입구로의 유입질량 유량에 연관됨을 볼 수 있었다. 포트커버 개방 후 연료의 분사와 점화, 연소과정을 통해 연소실의 압력이 상승하여 흡입구에 종단충격파가 형성되고, 아음속 유동장이 형성

된다. 이에 따라 연소실에서 아음속 연소환경이 형성되며, 연소실 내부의 압력교란에 의해 종단충격파 이후의 유동장 또한 교란됨을 알 수 있었다. 노즐 목 반경이 작은 경우에는 버즈 불안정 현상이 나타났다. 연소실의 압력 상승에 기인한 종단충격파의 카울 앞으로의 이탈로 인하여, 연소실로의 유입 유량이 변화하게 되고, 이에 따른 연소장의 변화에 의해 불안정 현상이 지속되었다.

#### 참고문헌

- (1) R. S. Fry, "A Century of Ramjet Propulsion Technology Evolution," *Journal of propulsion and power*, vol. 20, no. 1, 2004
- (2) H. G. Sung, "Unsteady Flowfield in an Integrated Rocket Ramjet Engine and Combustion Dynamics of a Gas Turbine Swirl Stabilized Injector," PhD Thesis, The Pennsylvania State University, 1999
- (3) R. W. Newsome, Jr. "Numerical Simulation of Near-Critical and Unsteady Subcritical Inlet Flow Fields," AIAA paper 83-0157, 1983
- (4) S. Venkateswaran, C. L. Merkle, "Analysis of Preconditioning Methods for the Euler and Navier-Stokes Equations, Von Karman Institute Lecture Series, 1999
- (5) Z. T. Yang and H. Shih, "New Time Scale Based  $k-\epsilon$  Model for Near Wall Turbulence," *AIAA Journal*, vol. 31, pp.1191-1197
- (6) S. Y. Hsieh, V. Yang, " A Preconditioned Flux-Differencing Scheme for Chemically Reacting Flows at All Mach Numbers," *Intl. J. of Computational Fluid Dynamics*, vol.8, pp.31, 1997