



## 가속되는 압축기 익렬의 비정상 성능해석

Unsteady Performance Analysis of Accelerating Compressor Cascade

\*김명호<sup>1)</sup>, 최정열<sup>2)</sup>, 김귀순<sup>2)</sup>, 이기수<sup>3)</sup>, 김유일<sup>4)</sup>, 임진식<sup>4)</sup>

M.-H. Kim<sup>1)</sup>, J.-Y. Choi<sup>2)</sup>, K. S. Kim<sup>2)</sup>, G. S. Lee<sup>3)</sup>, Y. I. Kim<sup>4)</sup> and J. S. Lim<sup>4)</sup>

An accelerating flow field through a compressor cascade is studied numerically by unsteady computational simulation. The two-dimensional Navier-Stokes equations for compressible flow is used for the study of unsteady high incidence angle flow, with preconditioning scheme to cover the wide range of Mach number and  $k-\omega$  model for the turbulent viscous flow analysis. A DCA(double circular arc) compressor blade is accelerated artificially in this study to understand the unsteady effect by comparing the present results with the existing steady-state experimental and computational results. Also, the accelerating flow field during the starting phase of gas turbine is studied with actual experimental data for the understanding of flow field and performance characteristics at off-design condition.

### 1. 서 론

가스터빈엔진의 성능을 좌우하는 요소 중에서 압축기의 역할은 매우 크다고 할 수 있다. 압축기의 유동은 3차원, 비정상, 난류유동으로 매우 복잡한 유동의 성향을 띄고 있으며, 역압력구배로 인한 박리가 크게 발생한다는 점에서 해석이 어려운 것으로 알려져 있다. 이전의 연구는 설계점 주위에서의 조건, 즉 입사각이 크지 않는 유동 조건에서의 연구가 진행되어 왔다[1,2]. 하지만, 고입사각에서의 실속 변화와 탈설계점에서의 손실 변화에 대해서는 깊은 연구를 행하진 못하였다. 일련의 압축기 블레이드에 대한 실험들이 정상상태 해석에 의존하고 있으므로, 고입사각에서의 비정상상태 해석에 대한 성능자료를 확보할 필요가 있다.

입사각이 증가하거나 감소하게 되면 블레이드에서 실속(stall)이 발생하게 된다. 선행 실험연구에서 실속은 통상 최소 손실의 두 배가 되는 점

을 실속 시작점으로 정의하였다[3]. 따라서 본 연구에서는 고입사각은 실속이 발생하는 시작점 이상의 입사각으로 정의할 것이다.

고입사각의 유동조건은 엔진의 idle 속도(50% 설계 속도) 이전 상태에서 주로 나타나므로 유동은 압축성 효과가 적거나 비압축성 영역이 된다. 그러나 엔진이 설계점에 이르면 유동은 압축성 효과를 나타내므로 비압축성 영역에서 압축성 영역까지 효과적으로 해석할 수 있는 수치해석 기법이 필요하다. 따라서 예조건화(Preconditioning) 기법을 이용한 압축성코드가 유동해석에 적용하였다[3]. 또한 익렬의 유동은 유동의 박리가 앞전(leading edge)에서부터 발생하여 유로 내 전 영역에 걸쳐 발생하므로 난류 유동장이 지배적이다. 이러한 난류 유동장 해석을 위해  $k-\omega$  모델을 적용하였다[4,5].

비정상상태해석의 수치적 타당성을 검증하기 위해 DCA(double circular arc) 압축기 익렬의

- 1) 부산대학교 대학원 항공우주공학과 (609-735 부산시 금정구 장전동 산 30, Tel : 051-510-3284)
- 2) 부산대학교 항공우주공학과 (609-735 부산시 금정구 장전동 산 30, Tel : 051-510-2373, 2436)
- 3) 항공우주연구원 (305-600 대전광역시 유성구 어은동 52번지, Tel : 042-860-2187)
- 4) 국방과학연구소 (대전광역시 유성우체국 사서함 35호, Tel : 042-821-2436)

실험결과[6]와 정상상태 해석을 통한 전산해석결과[7,8]를 비교함으로써 음의 고입사각에서 양의 고입사각으로 천이되는 유동의 특성을 살펴보았다. 또한 실제 압축기 시동에서 설계속도에 이르기까지의 속도 데이터를 이용하여 주로 양의 고입사각으로 유입되는 DCA 압축기 주위의 유동장을 살펴보았다.

## 2. 수치해법

### 2.1 지배방정식과 난류모델

유동해석을 위한 지배방정식은 2차원 비정상 압축성 Navier-Stokes 방정식으로 보존형 텐서식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) &= 0 \\ \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j + p \delta_{ij}) &= \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1) \\ \frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}((\rho e + p) u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i \tau_{ij} - q_j) \end{aligned}$$

여기서  $\tau_{ij}$ 와  $q_j$ 는 점성 전단 응력과 열유속(heat flux)을 나타내며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \quad (2) \\ q_j &= -k \frac{\partial T}{\partial x_j} \end{aligned}$$

식 (1)의 완전한 압축성 방정식을 구성하기 위해 이상기체 상태방정식은 다음과 같이 정의된다.

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

난류 유동장 해석을 위해 Menter의  $k-\omega$  모델[4,5]을 적용하였다. Menter가 제안한  $k-\omega$  모델은 복잡한 벽함수를 사용하지 않고도 경계층 내부의 유동을 잘 예측한다.

### 2.2 수치기법

본 연구에서의 수치기법은 특성 파동 속도를 유동장의 속도와 동일한 차수가 되도록 유지시켜 낮은 마하수에서 수렴을 가속화시켜 주는 예조건

화(Preconditioning) 기법[4]을 사용했다. 여기서 예조건화 행렬은 식 (4)와 같다.

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1/\beta^2 & 0 & 0 & 0 \\ u/\beta^2 & \rho & 0 & 0 \\ v/\beta^2 & 0 & \rho & 0 \\ h_i/\beta^2 - 1 & \rho u & \rho v & \rho c_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 예조건화 계수  $\beta$ 는 Shuen[9]이 제안한 식 (5)을 사용했다.

$$\beta^2 = u^2 + v^2 \quad (5)$$

낮은 마하수의 경우, 운동량 방정식에서 압력항의 특이성을 피하기 위해 압력항을 기준 압력과 게이지 압력으로 분할하는 압력 분리 기법이 사용되었으며 지배방정식을 내재적 시간 전진 기법으로 수행하기 위해 가상 시간 미분항을 지배방정식 (1)에 추가하여 정상상태의 수렴된 결과를 얻었다.

공간 이산화에 있어서는 Chakravarthy-Osher의 TVD 기법에 근거한 풍상 차분법[10]이 예조건화 지배방정식에 맞게 변형되었으며 MUSCL 기법을 적용하여 3차의 공간정확도를 갖도록 하였다. 시간 적분은 적용이 간편하고 경제적인 Yoon의 LU-SGS(Lower-Upper Symmetric Gauss Seidel) 기법[11]이 사용되었다. 비정상 계산의 경우 이중 시간 전진 기법(dual time stepping)[4]을 사용하여 2차의 시간 정확도를 갖도록 계산을 수행하였다.

본 연구에서는 유동의 유입조건이 아음속 영역에 해당하므로 유입 경계면에서의 경계조건은 유동의 양쪽방향 파동을 고려할 수 있도록 특성 경계조건(Characteristic Boundary Condition)을 적용하여 압력, 속도, 온도를 고정시켰다. 유출류 경계에서는 밖으로 향하는 교란이 경계에서 반사되지 않도록 국소적으로 1차원 파동방정식을 이용한 무반사 경계조건(Non-reflecting Boundary Condition)을 사용하였다. 주기경계조건으로 주기 선상의 값을 근접한 격자들의 평균값으로 취하는 외재적인 방법을 사용하였다. 벽면에서의 경계조건은 점착(non-slip) 조건을 주었고, 벽면 온도에 대해서는 단열조건을 주었다.

### 3. 수치계산결과

#### 3.1 고정된 저마하수 유동에서 입사각 변화에 따른 유동장 해석

비정상상태해석의 수치적 타당성을 검증하고 비정상상태효과를 예측하기 위해 참고문헌[7]의 실험결과 및 참고문헌[8]의 정상상태 전산해석결과와 비교하였다. 계산 격자계는 압축기 유동해석에서 일반적으로 많이 사용되는 H형 격자계를 사용하였다. 격자계의 크기는 Fig. 1과 같다. 전방격자면의 위치는 코드길이의 약 2배에 위치하도록 하였다. DCA 압축기 블레이드의 제원은 입구각이 56.5°, 출구각이 43.5°, 스테거각이 51°이다.

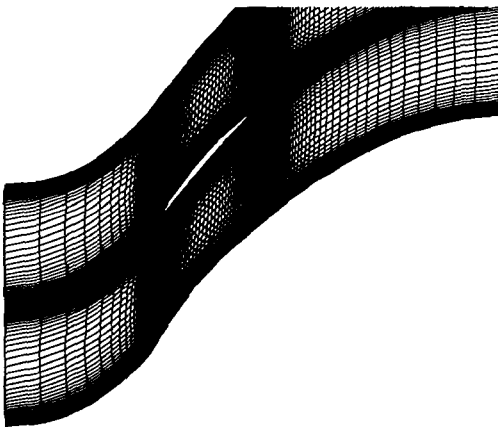


Fig. 1 계산에 사용된 격자계(181×61)

비정상상태해석을 적용하기 위해 적절한 시간을 두고 유동해석을 해야 한다. 여기서는 초당 각변화를 10°로 하면서 음의 고입사각(-35°)에서 양의 고입사각(+20°)으로의 천이되는 비정상상태해석을 수행하였다. 또한 위의 실험결과 및 전산해석결과의 비교를 위해 입구 마하수를 0.1로 고정하여 계산을 수행하였다.

압축기의 성능을 예측하기 위해 입사각에 따른 전압력손실( $\omega$ )를 사용하였으며 익렬의 100% 상류지점과 50% 하류지점의 전압력 차를 유량평균하여 식 (6)과 같이 계산된다.

$$\omega = \frac{\int_0^s \rho V_x (CP_t) dy}{\int_0^s \rho V_x dy} \quad (6)$$

여기서,

$$CP_t = \frac{P_{11} - P_{12}}{\frac{1}{2} \rho V_1^2} \quad (7)$$

또한 피치 방향에 따른 후류 전압력 손실 계수 ( $CP_t$ ) 분포와 벗어남각의 변화를 살펴보았다.

Fig. 2의 경우 입사각에 따른 전압력손실( $\omega$ )을 나타내고 있다. 여기서 비정상상태의 해석결과는 정상상태에서의 전압력손실보다 약 2배내지 3배 정도 크게 예측하고 있음을 알 수 있다. 시간에 지남에 따라 입사각은 변하게 되고 그로인해 관성력의 방향도 시간에 따라 바뀌게 되어 마찰손실이 증가하게 된다. 전반적인 유동의 특성은 증가한 마찰손실의 영향으로 압력손실이 증가하게 되고, 압축기익렬의 주위의 전압력손실의 계수가 정상상태에 비해 커지게 되는 경향을 보이게 된다.

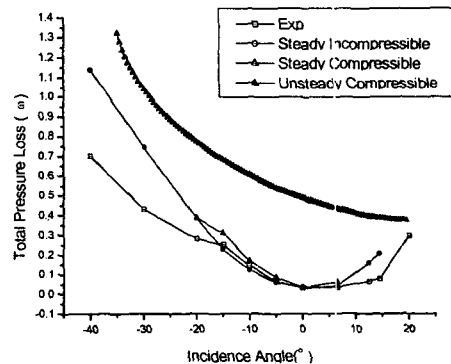


Fig. 2 입사각변화에 따른 전압력손실( $\omega$ ) 변화

Fig. 3의 경우 익렬의 50% 하류지점에서의 벗어남각(Deviation Angle)의 변화를 나타낸다. 전반적으로 정상상태와 비슷한 경향을 나타내고 있지만 입사각이 작아지는 -8° ~ -10°에서 벗어남각이 크게 예측되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 -8° ~ +10° 이외의 입사각에서는 정상상태 실험결과와 비슷한 결과로 예측하고 있다.

Fig. 4의 (a), (b), (c), (d) 그림의 경우 입사각이 -30°, -20°, 0°, +6.5°에서 무차원화된 피치방향에 대한 전압력손실계수 ( $CP_t$ ) 분포를 나타내고 있다. Fig. 2에서와 같이 전압력손실계수도 음의 입사각이 커지는 -30°, -20°에서 정상상태결과

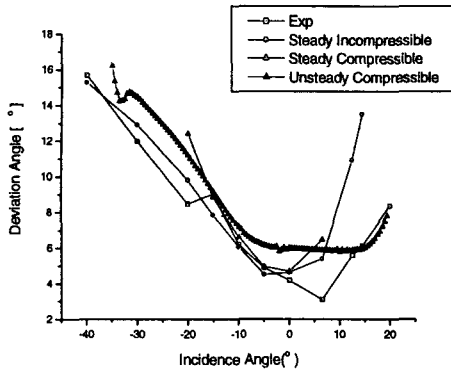
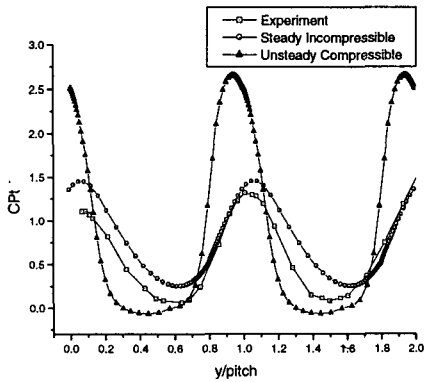
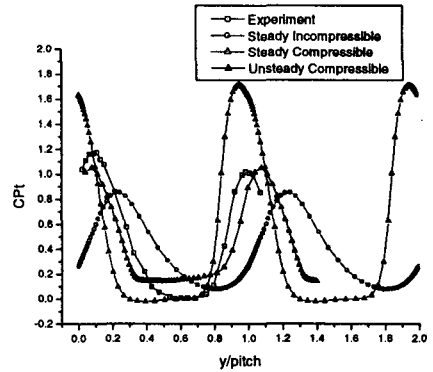


Fig. 3 입사각 변화에 따른 벗어남각의 변화

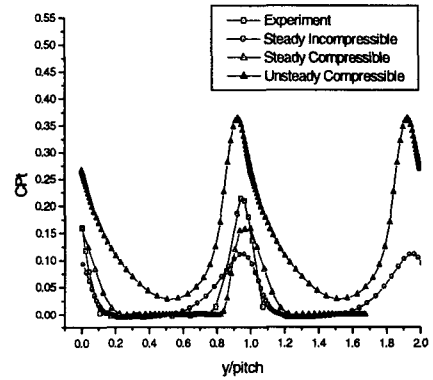
와 약 2배 정도 크게 예측하면서 입사각이 줄어들어 따라 정상상태 해석결과와 비슷한 양상을 띄고 있다. 전압력손실( $\omega$ ) 및 전압력손실계수( $CP_I$ )가 양의 입사각으로 변함에 따라 점진적으로 상승하지 못하고, 줄어고 있음을 확인할 수 있는데 이에 대한 연구는 계속진행중에 있다. Fig. 4에서  $y/pitch$  값이 0~1사이의 익렬의 압력면(pressure surface)에서 흡입면(suction surface)까지의 위치를 나타내고 있으며 1~2는 다시 그 주기가 반복된다. 여기서 고입사각으로 갈수록 전압력손실계수( $CP_I$ )의 최고인 피치의 위치가 왼쪽으로 치우쳐있는 경향을 볼 수 있다. 그 이유는 이전시간에서 발생한 유동이 다음시간에서도 이전의 관성을 유지하기 때문으로 예측되고 있다.



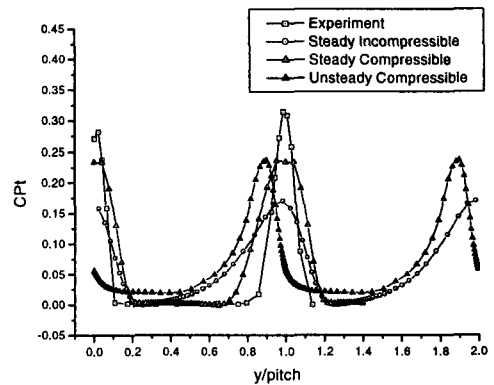
(a) 입사각  $-30^\circ$  에서의 전압력손실계수



(b) 입사각  $-20^\circ$  에서의 전압력손실계수



(c) 입사각  $0^\circ$  에서의 전압력손실계수



(d) 입사각  $+6.5^\circ$  에서의 전압력손실계수

Fig. 4 입사각변화에 따른 전압력손실계수의 변화



### 3.2 시동하는 DCA 압축기 주위의 유동 해석

실제 압축기 시동을 시작하여 설계속도에 이르는 정상상태에 이르기까지의 속도 데이터를 이용하여 익렬주위의 비정상상태에 대한 유동해석을 수행해 보았다. Fig. 5에서  $u$ 속도 성분은  $x$ 축 방향의 속도분포이고,  $v$ 속도 성분은  $y$ 축 방향의 속도분포 즉 압축기 익렬의 회전수에 의한 속도변화를 나타낸다. 시간이 지남에 따라 전체적인 유속의 변화는  $v$ 속도가 크게 나타나고 있으므로 Fig. 6에서 보듯이 주로 양의 입사각으로 유동이 유입되고 있음을 알 수 있다.

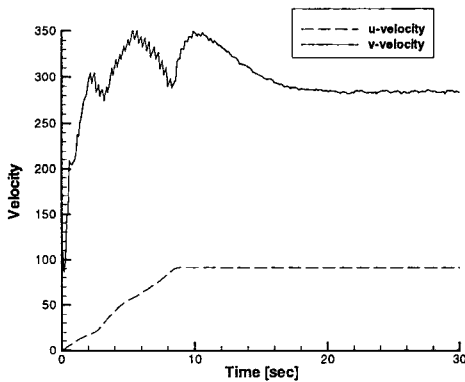


Fig. 5 시간에 따른 유동장 속도 분포

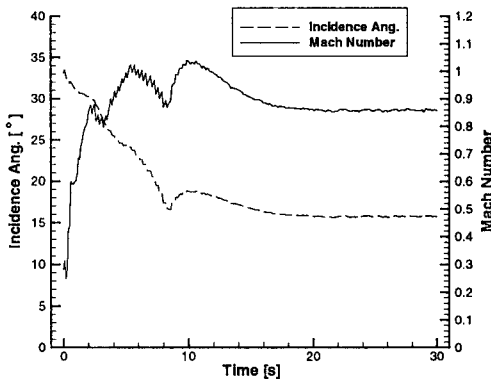


Fig. 6 시간에 따른 마하수 및 입사각의 변화

압축기가 시동을 시작하여 점화와 연료량조절을 조절하게 되고 그로인해  $\omega$ 속도가 변화하게 된다. 즉 회전속도가 줄어들므로 해서  $v$ 속도의 감소가 발생함을 Fig. 5에서 알 수 있다.

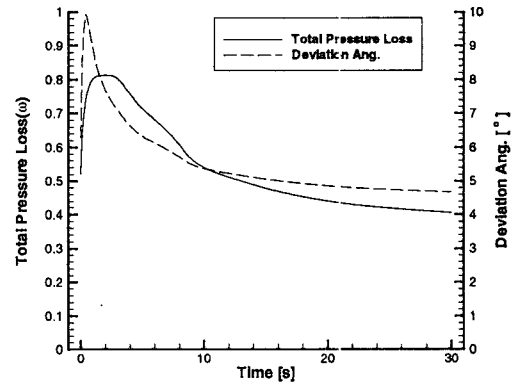


Fig. 7 시간에 따른 전압력손실( $\omega$ ) 및 벗어남각의 변화

Fig. 7은 Fig. 5의 조건에서 비정상상태 해석에 따른 압축기의 성능 변화를 살펴 보았다. 먼저 전압력손실은 마하수의 증가와 입사각의 감소로 인해서 점차적으로 줄어들어 정상상태에 이르는 것을 확인할 수 있으며, 시간이 지남에 따라 벗어남각(Deviation angle)의 변화 또한 전압력손실과 동일한 경향을 띄며 줄어들고 있다. 특히 회전속도가 급격히 상승하는 시간에서 전압력손실과 벗어남각이 최고값에 도달하게 된다. 전압력손실의 경우 최고 0.82까지 상승하게 되고, 벗어남각의 경우 10° 까지 증가한다.

전반적인 유동의 성향은 양의 고입사각으로 유입되고 있으며, 유동장의 압력분포는 역압력구배가 지배적으로 작용하게 된다. 또한 흡입면에서 발달한 박리영역이 시간이 지남에 따라 후류로 빠져 나가는 것을 관찰할 수 있다.

### 4. 결론

본연구에서는 비정상상태 해석을 통한 압축기 주위의 유동장을 해석해 보았다. 먼저 정상상태 해석결과와의 비교를 통해 비정상상태 해석결과와의 차이점을 알아 볼 수 있었다. 또한 음과 양

의 고입사각에서의 유동장 특징을 살펴봄으로써 탈설계점에서의 압축기성능을 예측할 수 있었다. 비정상상태해석결과를 통해 전압력손실( $\omega$ )과 전압력손실계수 ( $CP_t$ )가 정상상태해석결과에 비해 크게 예측되어 그 차이점을 확인할 수 있었다. 하지만 양의 고입사각으로 진행됨에 따라 전압력손실이 줄어드는 경향을 볼 수 있다. 이는 계속되는 연구를 통해 그 원인을 밝힐 필요가 있을 것이다.

압축기 시동에서부터 설계속도에 이르기까지의 압축기 익렬주위 유동장의 특징을 살펴본 결과 유동장은 전반적으로 양의 고입사각으로 유동이 유입되며 그로 인해 역압력구배가 지배적으로 작용하고 있음을 알 수 있었다. 흡입면의 박리영역이 시간이 지나고 속도가 상승하면서 후류로 밀려나가는 것을 살펴 볼 수 있는데 이 때 압력손실이 줄어들게 되고 벗어남각 또한 줄어들어 전반적인 압축기의 성능이 정상상태에 도달함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] Kunz, R. F., Lakshminarana, "Explicit Navier-Stokes Computation of Cascade Flows Using the  $k-\epsilon$  Turbulence Model," *AIAA Journal*, Vol. 30, No. 1, 1992, pp. 13-22.
- [2] Denton, J. D., "The Calculation of Three-Dimensional Viscous Flow Through Multistage Turbomachines," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 114, 1992, pp. 18-26.
- [3] Hsieh, S. Y. and Yang, Y. "A Preconditioned Flux-Differencing Scheme for Chemically Reacting Flows at all Mach Numbers," *IJCFD*, Vol. 8, 1997, pp. 31-49.
- [4] Menter, F. R., "Influence of Freestream Values on the  $k-\omega$  Turbulence Model Predictions," *AIAA Journal*, Vol. 30, No. 6, 1992, pp. 1598-1605.
- [5] Menter, F. R., "Two-Equation Eddy Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, 1994, pp. 1598-1605.
- [6] 홍기라, 송성진, 홍용식, "입사각의 변화에 의한 축류 압축기 캐스캐이드의 형상 손실," 한국항공우주공학회 추계학술대회 논문집, 1998, pp. 218-222.
- [7] 이기수, 김석훈, 최정열, 김귀순 "고입사각에서의 압축기 익렬 성능 연구," 제 15회 한국추진공학회 추계학술강연회 논문집, 2000. 11. 17., pp. 19.
- [8] 김석훈, 이기수, 최정열, 김귀순 "압축기 익렬 유동 해석을 위한 난류 모델링의 비교," 한국추진공학회지, 제 4권 제 4호, 2000, pp. 59-69.
- [9] Shuen, J. S., Chen, K. H. and Choi, Y. H. "A Coupled Implicit Method of Chemical Non-equilibrium Flows at All Speeds," *Journal of Computational Physics*, Vol. 106, No. 2, 1993, pp. 306.
- [10] Chakravarthy, S. R. and Osher, S. "A New Class of High Accuracy TVD Schemes for Hyperbolic Conservation Laws," *AIAA Journal*, 1985, Paper 85-0363.
- [11] Yoon, S. and Jameson, A., "Lower-Upper Symmetric Gauss Seidel Method for the Euler and Navier-Stokes Equations," *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 9, 1988, pp. 1025.