

# 모서리진 후향 계단의 유동특성 분석

한 철 희\*

한국교통대학교 항공기계설계공학과

## Analysis of Flow Characteristics Behind an Edged Backward Facing Step

Cheolheui Han\*

Department of Aeronautical and Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation,  
50 Daehak-Ro, Chungju-si, Chungbuk-do, 380-702, Korea

(Received 2014. 04. 24 / Accepted 2014. 05.16)

**Abstract** : Investigation of flow characteristics behind an edged backward facing step is important for selecting appropriate positions of building constructions in the desert area. In the present study, the effect of edge angles on the flow characteristics is investigated using a commercial software CFD-ACE+. When the edge angle is less than 30 degree, reattachment length decreases, whereas when the edge angle is larger than 30 degrees, reattachment angle increases. It can be concluded that the flow patterns behind an edged backward facing step is classified as the two, streamlined and bluffed bodies. Appropriate edge angles have an effect of increasing the momentum toward the wall, which can reduce the reattachment length. It can be said that present results can be utilized for diverse industrial applications that includes the backward facing step.

**Key words** : Backward Facing Step, Computational Fluid Dynamics, Bluff Body, Reattachment Length

### 1. 서 론

90도 경사를 가지는 후향 계단 관련하여 유동박리 및 재부착 현상 해석 등 난류전단층 거동에 대한 난류 모델들의 해석정확도 검증용으로 많은 연구가 이루어져 왔으며[1-2], 현재는 교과서나 프로그램 매뉴얼에 실릴 정도이다. 그러나, 90도를 제외한 다양한 경사각 또는 모서리를 가진 후향계단에 관한 연구는 상대적으로 크게 주목을 받지 못하여 왔다[3].

최근에 Ruck과 Makiola[3]는 다양한 레이놀즈 수에서 팽창비가 다른 경사 후향계단에 관한 실험 연구를 수행하였으며, 면적비를 증가시키거나 경사각을 증가시킬 경우 재부착길이가 증가함을 보여주었다. Singh 등[4]는 RNG 난류모델을 사용하여 경사각이 15도에서 90도까지, 팽창비가 1.48에서 2.0으로 변할 때

재부착 길이 및 유동특성변화에 관한 연구를 수행했다. 이들은 경사각, 팽창비 및 레이놀즈 수가 증가함에 따라 재부착 길이가 또한 증가함을 보였다. 이성호 등[5]은 CFD-ACE+를 사용하여 후향 계단 유동에 경사를 주어 와류의 발생이 줄어드는 것을 예측하였다. 특히, 작은 경사각에서는 와류가 발생하지 않았으며 경사각이 커짐에 따라 와류가 발생되는 것을 알 수 있었다. 또한, 팽창비의 증가는 재순환 영역의 상대적 크기 감소와 재부착 길이를 감소시키는 영향이 있음을 알 수 있다. 레이놀즈 수 증가는 재부착 길이의 감소에 영향이 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 이성호 등[5]의 연구를 기반으로 모서리를 가진 후향계단에서의 유동특성 및 재부착 길이 변화 특성을 연구하였다.

\*Corresponding author. E-mail : chhan@ut.ac.kr

## 2. 수치해석

본 연구에 사용된 지배방정식 및 난류모델은 이성호 등[6]이 사용한 방법과 동일하다.

유동 장을 해석하기 위한 연속방정식과 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

식(2)의 운동방정식 중  $\overline{u_i u_j}$ 는 다음과 같이 표현 된다.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (3)$$

식(3)에서 난류점성계수는 다음과 같이 표현된다.

$$\nu_t = C_{\mu} f_{\mu} \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

표준  $k-\epsilon$  모델은 다음과 같이 난류 운동에너지  $k$ 와 난류 소산율  $\epsilon$ 에 관한 두 개의 방정식 계산을 필요로 한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \rho P - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon) = C_{\epsilon 1} \frac{\rho P \epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

여기서,  $C_{\mu}=0.09$ ,  $C_{\epsilon 1}=1.44$ ,  $C_{\epsilon 2}=1.92$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_{\epsilon}=1.3$ 이다

본 연구에 사용한 경계 조건 및 격자 시스템은 다음과 같다. 모서리의 각은 다음과 같이 정의 된다.

$$\theta = \tan^{-1}(c/b) \quad (7)$$

격자는 2차원 정렬격자로 10만개의 격자를 사용하여  $10^{-6}$ 의 수렴조건하에서 계산을 수행했다. Fig.2에서 볼 수 있듯이 3000번 이내에서 수렴함을 알 수 있다.

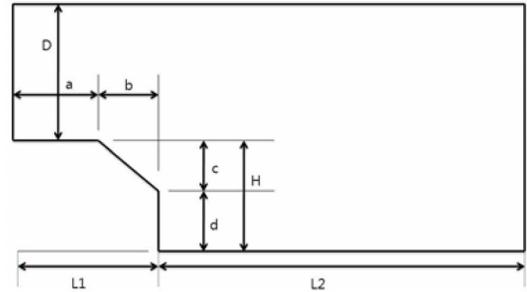


Fig. 1 Nomenclature for the present study

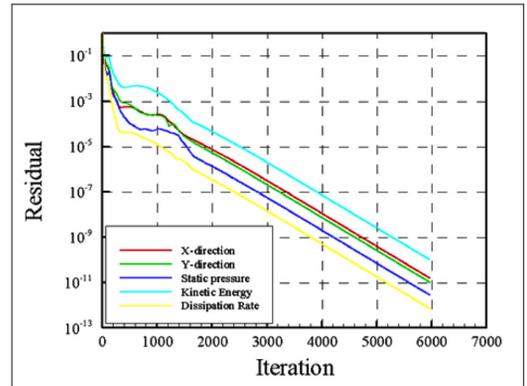


Fig. 2 Convergence behavior for present calculation

유체는 공기이며 상온에서의 물성치를 사용하였다. 본 연구에서 계산 한 속도는 10m/s 및 20m/s 두 개로 설정하였다. 밀도는  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 로, 점성계수  $\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ 로 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 사막의 풍속이 10m/s와 20m/s 두가지 경우에 대하여 풍속이 10m/s일때는 온도가 25도이며 풍속이 20m/s일때는 온도가 50도라고 설정하였다.

Fig.3에 모서리각 변화에 따른 재부착 길이의 변화를 나타내었다. 그림에서 임계 모서리각( $\theta$ )을 중심으로 모서리각 증가에 따라 재부착 길이가 감소하다 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 재부착길이의 크기는 풍속이나 온도변화에 거의 의존하지 않는 것으로 판단된다. 모서리각 증가에 따라 재부착 길이가 감소하다 증가하는 현상을 이해하기 위해 Fig.4에 풍속이 10m/s인 경우에 경사계단 주변의 유동특성을 나타내었다. 모서리각  $30^\circ$ 를 기준으로 모서리각이  $30^\circ$

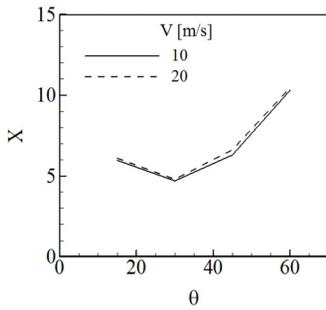


Fig. 3 Length of reattachment due to the change of edge angle.

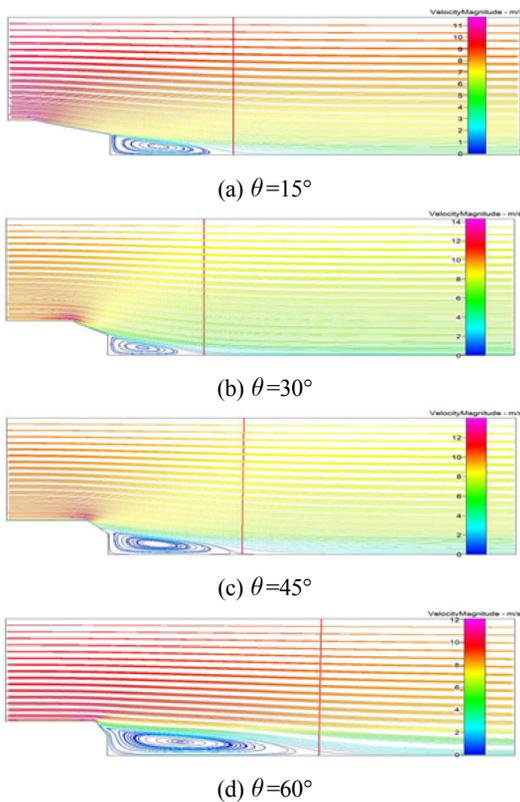


Fig. 4 Flow characteristics around the edged step when  $V=10\text{m/s}$ .

보다 작은 경우 모서리 끝에서, 모서리각이 30°보다 큰 경우 모서리 시작 부분에서 유동박리가 발생하였다. 모서리 각이 30°보다 작은 경우 모서리 앞 부분에서의 유동이 모서리 시작점을 지나며 유선형 흐름을 가진다. 모서리 각이 30° 이상으로 증가하면 급격한 형상 변화로 인하여 모서리 끝 부분에서 유동 박리가

발생하며 모서리각이 더 큰 값으로 증가하면 기하학적 형상 변화에 따른 유동박리 현상이 지배적이게 된다. 따라서, 반면 모서리 각이 30°이상 증가하면 유동박리점의 위치가 모서리 시작 부분으로 이동하며 전체 재순환 영역이 차지하는 크기가 증가하게 되며 이로 인하여 재부착거리 값이 증가한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 모서리각을 가진 후향계단의 모서리각 변화에 따른 유동박리 특성, 재부착길이 변화를 파악하였다.

모서리 각 크기 변화에 따라 모서리를 지나는 유동이 유선형 흐름과 둔한 물체 (bluff body) 뒤의 흐름으로 나누어지며, 이로 인하여 모서리 각이 30°인 경우를 기준으로 재부착 길이는 감소하다 다시 증가하는 경향을 보였다. 절한 모서리 각 ( $\theta=30^\circ$ )을 가질 경우 모서리 시작 부분에서 유선형 흐름을 가지면서 모서리를 통과 하며 아랫흐름 방향으로의 운동량 증가를 통해 재부착길이를 축소시킬 수 있다.

향후, 경사각 및 모서리각 변화에 따른 후향계단에서의 유동박리 특성에 관한 연구를 수행 할 예정이다.

#### References

- 1) W.K. Kim, Y.D. Choi, 1996, "The Study of Predictive Performance of Low Reynolds Number Turbulence Model in the Backward-Facing Step Flow", Trans. of the KSME(B), pp. 1661~1670.
- 2) J.W. Ahn, T.S. Park, H.J. Sung, 1997, "Application of a Near-Wall Turbulence Model to the Flows Over a Step with Inclined Wall", Trans. of the KSME(B), Vol. 21, No.6, pp. 735~746.
- 3) A.P. Singh, A. R. Paul, P. Ranjan, 2011, "Investigation of Reattachment Length for a Turbulent Flow over a Backward Facing Step for Different Step Angle", International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol.3, No. 2, 2011, pp. 84-88.
- 4) S.K. Choi, H.Y. Nam, M. Cho, 1995, "Numerical Simulation of Backward Facing Step Flow by a Second-Moment Turbulence Model", Trans. of the KSME(II), pp. 314~319.
- 5) S.H. Lee, G.J. Kim, W.J. Oh, and C. Han, 2011, "Computational Analysis of Reattachment Length and Flow Characteristics around Inclined Backward Facing Steps", J. of Institute of Green Growth, Vol.1, No.2