

# DES 모형을 이용한 270도 곡관 내 난류유동에 관한 수치해석

서정식\*, 신종근\*\*, 홍성호\*, 최영돈†

\*고려대학교 대학원, \*\*한중대학교 자동차공학과, † 고려대학교 기계공학과,

## Numerical investigation of Turbulent Flow in 270° Bend using DES approaches

Jeong-Sik Seo\*, Jong-Keun Shin, Seong-Ho Hong, Young-Don Choi

\*Graduated school, Korea University, Seoul 136-701, Korea

\*\*Department of Automotive Engineering, Hanzhong University, Dongheea 136-701, Korea

† Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

**ABSTRACT:** Detached Eddy Simulation(DES) is performed for turbulent flow of the 270° bend at a Reynolds number of 56,690. A Fine grid generation is used near a wall in order to satisfy the wall boundary condition of  $y^+ < 1$ . Turbulence models adopted for DES and Reynolds Average Navier Stokes(RANS) simulation are SST(Shear Stress Transfort) model. Solutions for both streamwise and circumferential velocity components are compared with the experimental data by Lee for 270° bend and by Chang for 180° bend.

**Key words:** DES(Detached Eddy Simulation), Bend(곡관), Turbulent intensity(난류강도), RANS(Reynolds Average Navier Stokes equation)

### 기 호 설 명

$D_h$  : 수력직경

$\epsilon$  : 난류운동에너지 소멸율

$k$  : 운반상 난류운동에너지

$\omega$  : 와도

$S$  : 변형율( $= \partial U_1 / \partial x_2 = \partial V_1 / \partial x_2$ )

$L_t$  : 난류 길이

$\tilde{l}$  : 난류길이

$\rho$  : 유체의 밀도

$\mu$  : 점성계수

$\mu_t$  : 난류 점성계수

$\nu_t$  : 난류 동점성계수

$\tau_w$  : 벽면의 전단응력

$\delta$  : 경계층 두께

$u^*$  : 대수영역 속도

$u_\tau$  : 마찰 속도

$u^+$  : 벽근처 속도

$\Delta y$  : 벽면으로 부터의 거리

$y^+$  : 벽면으로 부터의 무차원거리

$\kappa$  : von Karman 상수

C : log-layer 상수

$F_1, F_2$  : 혼합함수(blending function)

$\Delta$  : 국부 격자 간격

$\Delta_S$  : 국부 표면 격자 간격

$W_B$  : z방향 단면 평균속도

† Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3355; fax: +82-2-926-9290

E-mail address: ydchoi@korea.ac.kr

## 1. 서론

곡관 내의 유동현상은 터보기계 및 다양한 열 유체 기기에서 발생하는 대표적인 유동현상이다. 이러한 곡관유동은 곡률에 의한 효과로 인한 원심력의 작용으로 일반적으로 직관의 유동과 다른 3차원의 복잡한 유동특성을 가지게 된다. 곡관 유동에 대한 연구는 다양한 수치적, 실험적인 접근방법으로 수행되어 왔으며, 연구 대상인 기하학적인 형상역시 90도 180도<sup>(1,2)</sup> 등의 다양한 각도의 곡관에 대해서 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 곡관의 관경의 확대 축소의 효과라든지, 입구 쪽에서 회전을 주는 원환류(torus flow)등의 다양한 입구조건을 변화시켜 실제 기기에서 발생할 수 있는 곡관 내의 유동 현상을 연구하고 있다. 이러한 곡관 유동 특성을 보다 정확히 이해하기 위해서는 곡관유동에서 발생하는 난류성분을 정확하게 예측해야 한다.

최근 전산기의 발달로 인한 계산속도의 증가로 과거와 비하여 직접 수치모사법(Direct Numerical Simulation)과 대형화 수치기법(Large Eddy Simulation)을 적용하기도 한다. 하지만, 공학적인 문제에 적용하기에는 아직까지는 전산기 용량과 계산시간의 제약으로 어려운 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서, Spalart<sup>(3)</sup> 등은 벽 근처에서는 RANS 모형을 사용하고, 와류동이 큰 영역에서는 LES모형을 사용하는 혼합된 모형인 DES(Detached Eddy Simulation) 모형을 제안하였으며, RANS 모형으로 1방정식 난류모형인 k 방정식모형을 사용하였다.

Strelets<sup>(4)</sup> 등은 RANS계산에는 난류모형으로 SST(shear stress transport)모형을 사용하여, LES 모형과 연동하는 DES 모형을 제시하였다. 현재 DES경우, 그 RANS과 LES사이 경계부분에 대하여 문제점을 가지고 있지만, 공학적인 문제에 대해서 적용할 수 있는 난류모형이라고 할 수 있다. 하지만, 이러한 DES은 아직 다양한 공학적인 문제에 적용된 경우가 많지 않으며, 좀더 다양한 공학적인 문제에 대하여 연구가 필요하다.

본 연구에서는 실제 유동에 가까운 형태인 270도 곡관유동에 대하여, 다양한 난류모형을 적용하여 난류 모형에 따른 유동특성을 비교하고자 한다. 사용된 난류 모형은 RANS 모형인

Menter<sup>(4)</sup>가 제안한 SST(Shear Stress Transport) 모형 그리고 Sterelets<sup>(5)</sup>의 SST-DES 모형을 가지고, 270도 곡관 내의 난류 유동특성을 수치해석해서 270도 곡관의 실험결과<sup>(7,8)</sup>와 비교하고 그 난류유동 특성을 분석하고자 한다.

## 2. 수치 해석 방법

### 2.1 유동조건 및 격자 생성

본 연구에서 사용된 유동조건은 레이놀즈수 56,690이며 이때, 밀도( $\rho$ )는 1.265kg/m<sup>3</sup>이고, 점성계수( $\mu$ )는 1.983×10<sup>-5</sup>kg/ms이다. 초기유동조건은 80Dh의 직관유동을 충분히 수렴시켜 완전 발달된 난류유동조건을 사용하였다. 사용된 격자는 단면 방향에 대해서 101×101이며 주 유동 방향에 대해서는 214개를 주었으며, 벽에서는 조밀 격자를 주어  $y^+ < 1$ 을 유지하도록 하였다. 사용된 총 격자수는 2,183,014개이다.

초기 유입구의  $x/Dh=0.5$  위치에서 대표  $u_r$ 값을 구해, 이를 이용하여, 계산된 최소격자 $\Delta x^+$ ,  $\Delta y^+$ ,  $\Delta z^+$ 는 0.32, 0.32, 32이다.

모든 벽은 no slip 경계조건을 주었으며 출구에서는 노이만 경계조건(Neumann condition)을 주었다.

Fig. 1은 사용된 기하학적 형상과 유동방향을 나타낸다. 실제 초기 유동조건은 270도 곡관 유입부에 4Dh의 여유를 초기 유동조건이 유입되도록 하였으며, 출구 쪽에는 2Dh의 여유를 두고 출구조건을 주었다.

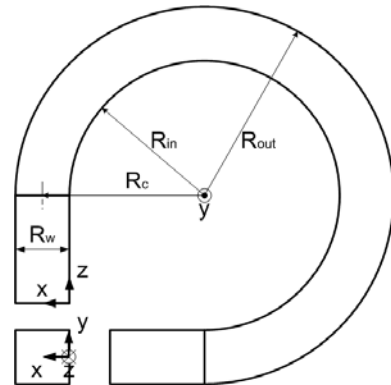


Fig. 1 Schematic of a computational domain

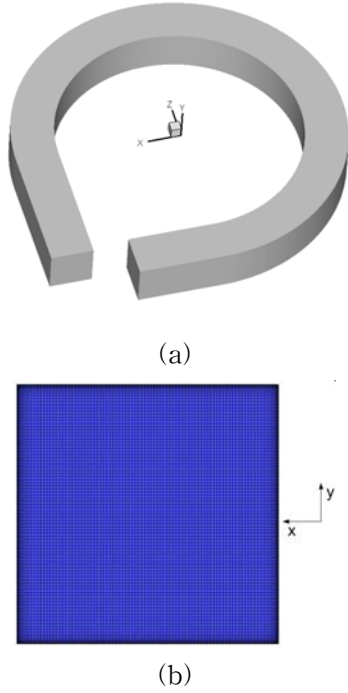


Fig. 2 Schematic of a computational domain

Table 1 Dimension and flow conditions

Content	unit	value
Mean velocity	m/s	9.996
Reynolds number		56,690
Hydraulic diameter	m	0.0889
Inner radius of curvature	m	0.254
Outer radius of curvature	m	0.343

Table 1은 유동조건과 기하학적인 변수를 정리하여 나타낸 것이다. Fig. 2는 사용된 격자계를 나타내며, (b)는 단면 격자계를 보여준다.

본 연구에서 DES 모형은 비정상(transient) 문제에 대해 해석하는 모형이다. 사용된 시간 간격은  $0.1Dh/W_B$ 로 설정하였다. 전달항(convective term)에 대한 수치 계산방법은 RANS일 때는 상류차분법(upwind)을 사용하고 LES 모형일 때는 중앙차분법(central scheme)을 사용하는 혼합차분법(hybrid scheme)을 사용하였다.

본 연구의 계산은 CFX 10.0 과 CFX 11.0코드를 가지고 계산하였으며, 슈퍼 컴퓨터(IBM-690)와 병렬 컴퓨터를 이용하여 수행되었다.

## 2.2 난류 모형

### 2.2.1 SST 모형(Shear Stress Transport model)

본 연구에서 사용된 SST 모형은  $k-w$ 모형에서 변형된 난류 모형으로  $menter^{(4)}$ 가 제안한 모형이다. 이 난류 모형은 기존의 난류 전단 응력 전달 방정식(turbulent shear stress transport equation)이 에디 점성(eddy viscosity)값이 실제보다 크게 예측되는 문제를 해결하기 위해서 제한자(limiter)를 연결하였다.

$$\nu_t = \frac{a, k}{\max(a, w, SF2)}, \quad \nu_t = \mu_t / \rho \quad (1)$$

$F_2$ 는  $F_1$ 과 유사한 혼합함수(blending function)로서 벽 경계층에서 제한자(limiter)를 제한하는 함수이다.  $S$ 는 변형률(strain rate)의 불변항(invariant measure)을 의미한다. 본 연구에서 사용된 혼합함수식(blending function equation)은 식(2)와 식(3)과 같이 정의된다.

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (2)$$

$$\arg_1 = \min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta wy}, \frac{500v}{y^2w}\right), \frac{4\rho k}{CD_{kw}\sigma_{w2}y^2}\right) \quad (3)$$

여기서  $y$ 는 가장 가까운 벽에서 거리를 의미하며,  $v$ 는 점성계수를 의미한다.  $CD_{kw}$ 와 함수  $F_2$ 는 식(4), 식(5)과 식(6)으로 나타내어진다.

$$CD_{kw} = \max\left[\frac{2\rho}{\sigma_{w2}w} \nabla k \nabla w, 1.0 \times 10^{-10}\right] \quad (4)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (5)$$

$$\arg_2 = \min\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta wy}, \frac{500v}{y^2w}\right)\right] \quad (6)$$

### 2.2.2 SST-DES 모형

SST-RANS 모형은  $sterelets^{(2)}$ ,  $Travin$ 에 의해 제안되었으며, 기존의 RANS 모형인 SST모형에 의해 예측된 난류 길이척도  $l_t$ (turbulent length scale)값이 국부 격자척도(local grid scale)보다

크게 되면 계산모형을 RANS 모형에서 LES 모형으로 바꾸는 형태의 난류모형이다. 국부격자척도는  $C_{DES}\Delta$ 로 나타내며, 식(7)처럼 나타내듯 난류길이척도(turbulent length scale)는 난류운동에너지(turbulent kinetic energy) 방정식에서 소산항(dissipation term)의 계산에 사용되는데 이것을 국부 격자 척도(local grid scale)로 바꾸어 사용하게 된다.

$$\varepsilon = \beta^* k w = k^{3/2} / L_t \rightarrow k^{3/2} / (C_{DES} \Delta) \quad (7)$$

일반적으로  $C_{DES}\Delta$  값은 0.65가 사용된다.

본 연구에서 사용된 CFX 코드에서는 이런 개념에 혼합함수(Blending function)을 적용해서,

$$F_{DES-CFX} = \max\left(\frac{L_t}{C_{DES}\Delta}(1 - F_{SST}), 1\right) \quad (8)$$

$F_{SST} = 0$  이면 standard SST-DES모형<sup>(5)</sup>으로 난류 에너지 방정식의 소산항에 나타나는 길이 척도를 수정하여, 벽 근처에서는 RANS 방법을 사용하고, detached 영역에서는 LES 방법을 사용하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 수치해석 타당성 검토

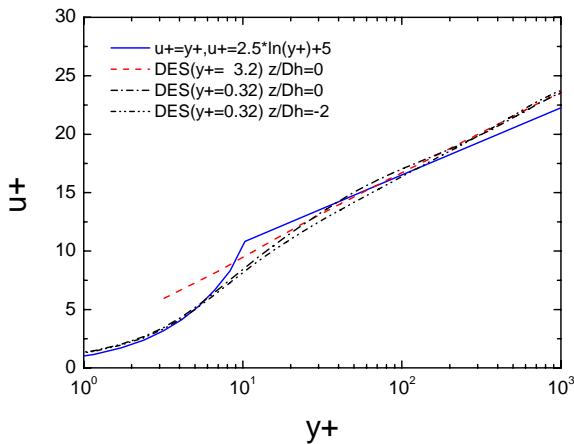


Fig. 3 Comparison of wall skin velocity profiles

Fig. 3은  $y+$  값에 따른  $u+$ 의 값을 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 DES 모형은 벽 근방에

서 RANS으로 계산을 수행하며, 본 연구에서 사용된 DES경우는 RANS(SST)으로 작동하게 된다. 사용된 격자계는  $y+$ 가 3.2값을 가지는 경우와,  $y+$ 가 0.32값을 가지는 경우에 대해서, 그  $u+$ 의 분포를 나타내었다.  $y+ < 1$ 인 영역은  $y+$ 와  $u+$ 가 같은 값을 가지는 것을 보여주고 있으며,  $y+ > 100$ 에도 이론적 값과 일치하고 있는 것을 보여주고 있다.

#### 3.2 주방향 속도분포( $U_\theta$ )

본 연구에서 계산되어진 값은  $x, y, z$  좌표계를 이용해서, 계산되어졌으며, 이들의 값은 원통형좌표계로 변경하여 Fig. 4, 5, 6처럼 나타냈다.

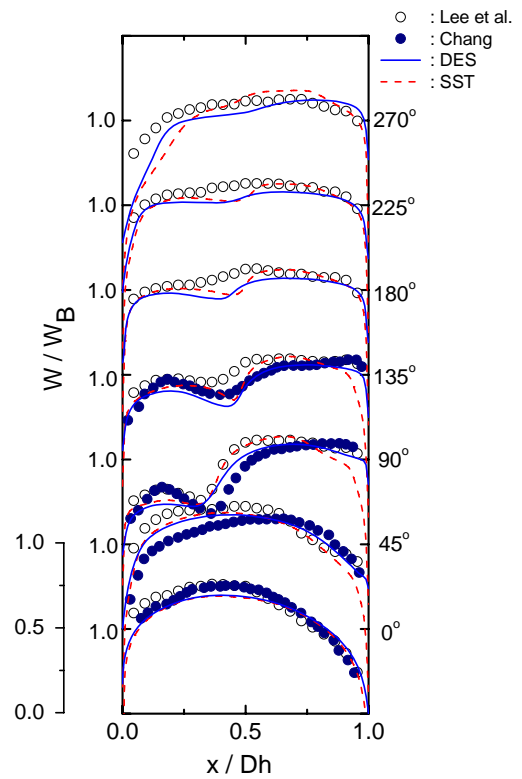


Fig. 4 Comparison of predicted and measured normalized  $W(U_\theta)$  velocity profiles

Fig. 4는 주방향속도( $U_\theta$ )를 입구단면 평균속도  $W_B$ 로 무차원하여 나타낸 것이다. 다른 논문과의 비교를 위해서, 각 단면에서의 직교좌표계에 의한 속도( $W$ )를 같이 표기하였다.  $y/Dh=0$ 에서의 곡관의 각도에 따라 나타내었다. 실제 각도0도에서 유입되는 입구속도는  $4Dh$  앞쪽에서 완전 발달된 사각채널유동이다. 하지만, 곡관의 영향으로 내벽 쪽으로 가속되어지면서, 내측벽( $x/Dh = 0$ )으

로 기울어진 형태를 띠고 있다. 계산에 사용된 DES와 RANS(SST)역시 Lee와 Chang의 실험값과 정성적으로나 정량적으로 유사함을 보여주고 있다. 특히, 기존의 180곡관에서 보여주고 있는 180도 곡률 이후 외벽 쪽으로 이동하는 모습을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 반경향속도( $U_r$ )를 입구단면 평균속도  $W_B$ 로 무차원하여 나타낸 것이다. 주방향 속도에서 보여주는 것과 달리 반경방향 속도 분포는 다소 차이나는 것처럼 보여준다. 하지만, DES 경우 Wake가 발생하는 90도와 135도에서 RANS(SST)와 달리 급격한 유동변화를 따라가고 있는 것을 보여주고 있는 것을 확인할 수 있다.

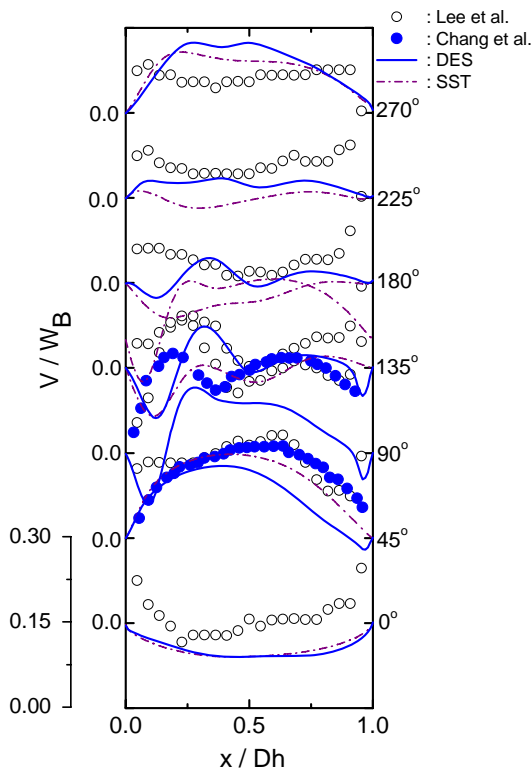


Fig. 5 Comparison of predicted and measured normalized  $V(U_r)$  velocity profiles

### 3.2 난류요동성분 분포

Fig. 6은 난류요동성분인  $w'$ 을 곡관의 각도에 따라서 나타낸 것이다. RANS(SST)경우는 계산 값이 없기 때문에 DES의 결과만을 도시하였다. 곡관에서의 정확한 난류성분의 예측은 곡관유동 특성을 이해하는데 큰 도움이 된다. 0도 45도에서 DES의 결과는 실험값과 일치하며, 90도를 지

나면서, 그 값이 다소 차이가 나기는 하지만, Chang과 Lee의 실험값에서 보여주는  $y/D=0.5$ 근방에서 90도에서 135도에서 발생하는 요동성분의 추세를 모사하고 있는 것을 확인할 수 있다.

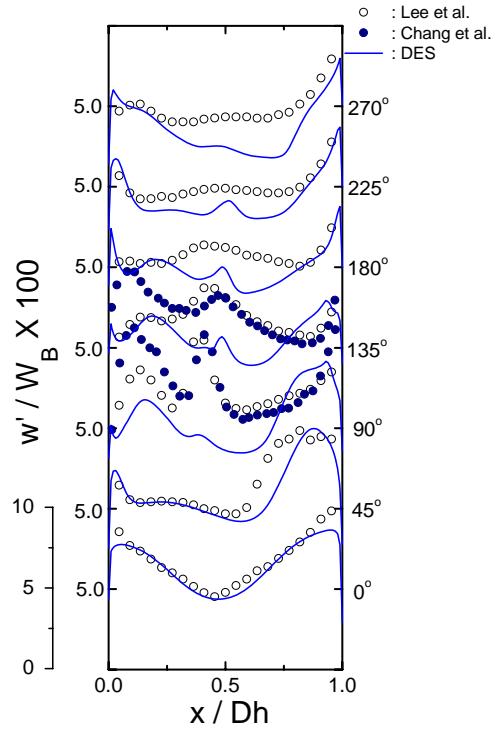


Fig. 6 Comparison of predicted and measured normalized  $w'$  turbulent intensity profiles

### 3.3 와도 분포( $\omega_y$ )

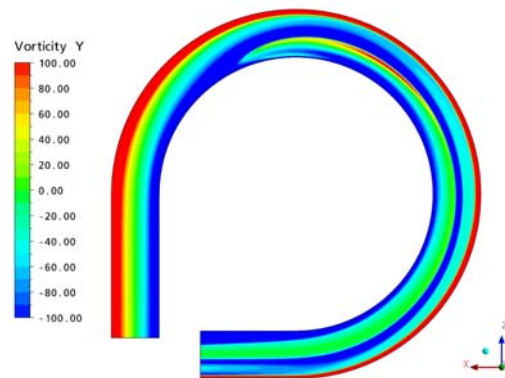


Fig. 7 Vorticity contour at symmetric plane

곡률효과를 비정상유동에서 확인하고자, 와도(vorticity)  $w_y$ 의 분포를 곡관의 유동방향에 대해서 나타낸 것이다. Fig. 7과 Fig.8은 전체시간 0.4초에서 와도분포를 나타낸 것이다.

## 참고문헌

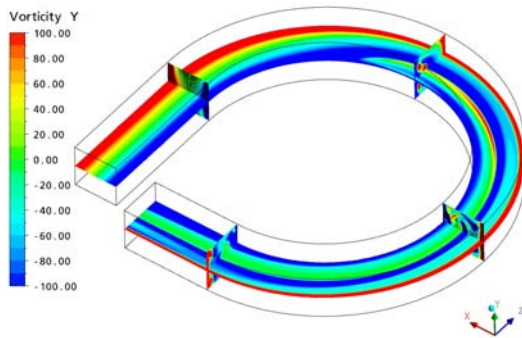


Fig. 8 Vorticity contour at symmetric plane and cross-sectional plane ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  and  $270^\circ$ )

## 4. 결론

본 연구는 정사각 단면을 갖는 270도 곡관에서의 난류유동에 대하여, DES과 RANS(SST)을 이용하여, 수치해석을 수행하였다. 계산된 결과와 270도 곡관에 관한 실험결과<sup>(7)</sup>와 180도 곡관에 관한 실험결과<sup>(8)</sup>와 비교하여 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 곡관의 각도변화에 따라, SST, DES의 결과를 비교하였다. 주방향 속도분포에서 두 모형 모두 실험값과 잘 일치하였으며, 초기 내벽 쪽의 유동이 270도에 이르면서 외벽 쪽으로 밀려가고 있는 유동특성을 확인할 수 있었다.

(2) 반경방향 속도분포에서는 유동변화가 심한 90도와 135도 구간에서 DES의 수치결과가 SST 모형에 비해, 비교적 근사하게 실험값을 모사하고 있음을 확인하였다.

(3) 난류요동성분 분석을 통해, DES의 계산 결과가 실험값을 잘 예측하고 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술정보연구소(KISTI)에서 시행한 10차 슈퍼컴퓨터 전략과제의 지원으로 수행되었음.

1. 최영돈, 이건휘, 1998, “열선유속계에 의한  $180^\circ$  곡관을 갖는 원형 단면의 덕트에서의 난류유동특성의 측정”, 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B pp.365~370
2. 문 찬, 이건휘, 최영돈, 1992, “직사각형단면을 갖는  $180^\circ$  곡관에서의 강제 대류 열전달 특성에 관한 실험적 연구”, 대한기계학회논문집 제 16권 제2호, pp.290~301
3. Strelets, M., 2001, “Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows”, AIAA Paper 2001-0879, 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno.
4. Menter, F.R., Kuntz, M., 2002, “Adaptation of Eddy-Viscosity Turbulence Models to Unsteady Separated Flow Behind Vehicles”, Proc. Conf. The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Busses and Trains, Asilomar, Ca
5. Menter, F. R. and Kuntz, M., “Development and Application of a Zonal DES Turbulence Model for CFX-5”, CFX-Validation Report, CFX-VAL17/0503.
6. Menter, F.R., 1994, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications”, AIAA-Journal., 32(8), pp. 1598 - 1605
7. 이건휘, 조석휴, 2000, “정사각 단면의 270도 곡관에서의 난류유동 특성에 관한 수치해석”, 공업기술개발연구지 제20집
8. Chang, S. M., Humphrey, J. A, C. and Modavi, A., 1983, “Turbulent Flow in a Strongly Curved U-bend and Downstream Tangent of Square Cross Sections,” PHC Physic chemical Hydrodynamics, Vol. 4, pp. 243