

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.6.471

DES 기법을 이용한 270°곡덕트에서 발달하는 난류 유동의 수치해석

서정식* · 신종근** · 최영돈† · 이주철***
(2008년 2월 20일 접수, 2008년 4월 16일 심사완료)

Detached Eddy Simulation of a Developing Turbulent Flow in a 270° Curved Duct

Jeong Sik Seo, Jong Keun Shin, Young Don Choi and Joo Cheol Lee

Key Words : DES(Detached Eddy Simulation), Curved Duct(곡덕트), Turbulent Flow(난류 유동), RANS(Reynolds Average Navier Stokes Equation Simulation)

Abstract

Detached Eddy Simulation (DES) is performed for developing turbulent flow of the 270° curved duct at a Reynolds number of 56,690. The curvature ratio on the basis of a centric radius R_c and a duct height H is 3.357. Turbulence models adopted are $k-\omega$ model for Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) equation Simulation and Shear Stress Transport (SST) model for DES. DES is used as the hybrid computation technique combined with RANS-SST and Large Eddy Simulation (LES). Predicted results are compared with measured results including the distributions of Reynolds stresses and the flow characteristics on the symmetric plane of curved duct are presented. Judging from the comparison between the predicted and the measured results, the DES approach is applicable to calculate the developing turbulent flow in a 270° curved duct.

기호설명

U_b : 입구단면 평균속도: 덕트의 높이
 k : 난류운동에너지
 S : 변형률 텐서(S_{ij})
 l_t : 난류길이척도
 u^+ : 벽면 마찰 속도
 y^+ : 벽면으로부터 무차원거리
 F_2 : 혼합함수(blending function)
 Δt : 계산시간간격(time-step)
 C_{DES} : DES 상수

u, v, w : 직교속도 벡터
 x, y, z : 곡덕트 단면의 직교좌표성분
 r, y, θ : 곡덕트 원통좌표계 성분
그리스 문자
 Δ : 국부격자척도
 ε : 난류운동에너지 소멸률
 ω : 비소멸률
 ν : 동점성계수
 ρ : 밀도

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : ydchoi@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3355 FAX : (02)929-9290

* 고려대학교 대학원
** 한중대학교 자동차공학과
*** 태성엔스트㈜

1. 서론

원형이나 사각단면을 갖는 곡관 및 곡덕트 형상은 오늘날 블레이드 통로, 압축기 및 터빈의 구성장치, 건물 공조시스템의 배관계통 그리고 열교환

기의 냉각시스템 등 열·유체 기기에서 가장 많이 사용되는 형상이다. 이러한 기하학적 형상을 갖는 경우 곡률효과가 유동장에 지배적으로 작용하여 복잡한 유동특성을 보유하게 된다. 또한 이러한 곡률에 의해 유동장의 단면에서 발생하는 2차유동이나 곡관 내 압력의 재분배현상들은 터빈설계뿐만 아니라, 열 교환기 운전 시에 소음을 발생시키거나 기기손실에 영향을 주는 주요 인자들이 된다.

곡관 및 곡덕트 내의 유동특성을 알아내기 위해서는 관내의 난류유동 현상을 정확히 규명할 필요가 있다. 이러한 난류유동 특성을 이해하기 위해서 현재까지 많은 연구자들에 의해 수치적, 실험적인 접근방법들이 수행되어 왔으며, 연구 대상인 기하학적 형상은 주로 90° 및 180° 의 곡률을 갖는 곡관 및 곡덕트로 제한되어 있다. 180° 곡관 및 곡덕트에 대해서는 열선유속계⁽¹⁾나 LDV^(2,3)를 이용하여 관내의 주방향 속도성분과 난류요동성분을 직접 측정하여 유동특성을 알아내거나, 수치적 방법을 이용하여 곡관 내 난류유동 특성을 분석하여 설계에 반영하는 연구들이 활발히 진행되어 왔다. 특히, 수치적 접근에서는 곡관 및 곡덕트 내의 난류유동 특성을 모사하기 위하여 다양한 난류모형을 적용하는 연구⁽⁴⁻⁷⁾가 진행되어 왔다. 그러나 실제 곡관 및 곡덕트에서는 180° 이상의 곡률을 갖는 경우가 많이 있으나 아직까지 실험적으로나 수치적으로 접근이 거의 이루어지지 않은 상태이다.

180° 이상의 곡덕트에 관한 연구로는 조 등⁽⁸⁾이 열선 유속계로 270° 곡덕트에 관한 실험을 수행하여 주유동 방향 평균속도 분포와 난류요동성분을 얻어낸 바 있다. 180° 이상의 곡률을 갖는 곡관 및 곡덕트 내의 유동특성을 정확히 이해하기 위해서는 보다 많은 실험 자료가 필요하지만, 기하학적인 형상 때문에 180° 의 경우보다 실험장치 구성과 측정 역시 어려운 실정이다.

최근 전산기의 발달로 인해 공학적인 계산시 많이 사용되던 2방정식 난류모형인 모형 보다 정밀한 난류모형의 사용이 가능하게 되었고, 현재는 대와동모사(Large Eddy Simulation; LES)를 공학적인 문제에 도입하기에 이르렀다. 그러나 공학적인 문제에 LES 기법의 적용은 아직까지 전산기용량과 계산시간의 비용을 고려한다면 효율적이지 못하다.

이러한 문제를 해결하기 위해서, RANS(Reynolds Average Navier Stokes Simulation)에 적용되는 난류모형의 장점과 LES기법의 장점을 혼합하여 계산속도와 해의 정확성을 향상시키는 연구들이 진행되어 왔다.⁽⁹⁻¹²⁾

먼저 Spalart⁽⁹⁾와 Squires *et al.*⁽¹⁰⁾은 벽 근처에서는 RANS 모형을 사용하고, 박리유동과 같이 와류동이 활발한 영역에서는 LES를 사용하는 혼합된 방법인 DES(Detached Eddy Simulation) 기법을 제안하였다. 이들은 벽 근방에서는 RANS 모형으로 1방정식 난류모형인 k - ω 모형을 적용하였다. 이에 반해 Strelets⁽¹¹⁾와 Travin *et al.*⁽¹²⁾은 RANS 계산 시에는 k - ω 모형을 기반으로 만들어진 SST (Shear Stress Transport)⁽¹³⁾모형을 사용하고, 벽면으로부터 멀리 떨어진 유동장의 중심부에서는 LES로 연동되는 DES기법을 제시하였다. 현재까지 제안된 대부분의 DES기법은 RANS와 LES사이의 경계부분에 대하여 문제점을 가지고 있지만, 공학적인 문제에 대해서 가장 효율적으로 적용할 수 있는 방법이라고 할 수 있다. 그러나 이 DES는 현재까지 공학적인 문제에 적용된 경우가 많지 않기 때문에, 좀 더 다양한 유동장에 적용 및 분석 후 이 기법에 대한 검증이 이루어져야 한다고 본다.

본 연구에서는 실제 유동형상에 보다 가까운 형태인 270° 곡덕트 유동에 대하여 RANS 난류모형인 k - ω 모형과 Strelets⁽¹¹⁾가 제안한 혼합기법인 DES 기법으로 이용하여 수치해석을 수행하고자 한다. 수행된 결과를 실험결과^(3,8)와 비교하고 기존의 k - ω 모형과 비교하여 270° 곡덕트 내의 발달하는 난류유동 특성 분석 및 새로운 수치모형인 DES기법의 타당성을 알아보하고자 한다.

2. 수치해석

본 연구에서 고려된 수치해석 대상은 정사각 단면을 갖는 270° 곡덕트 내의 발달하는 난류유동이다.

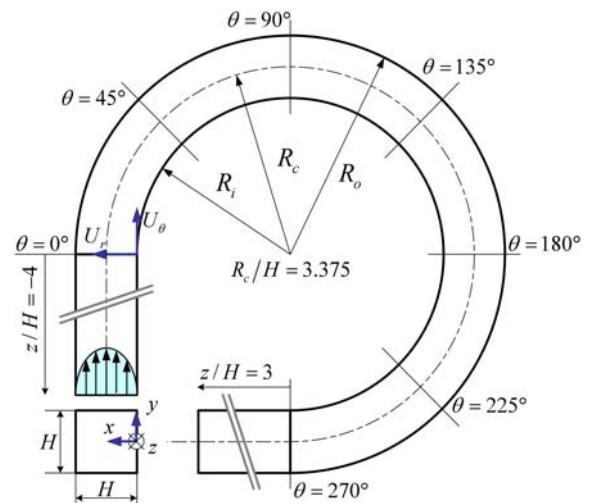


Fig. 1 Schematic of a 270° curved duct

Fig. 1 은 본 수치해석에 사용된 기하학적 형상 및 좌표계를 개략적으로 나타낸 것이다. Fig. 1 에서 주유동 방향(streamwise direction)인 z 방향의 속도는 U_0 로 곡덕트의 단면에 수직한 반경방향(radial direction)의 속도는 U_r 로 표기하였다. 또한 x, y, z 의 거리는 정사각 덕트의 높이 H 를 이용하여 무차원하여 나타내었다. 실제 곡덕트에서 곡률이 발생하는 지점인 각도 0° 인 곳을 곡덕트 입구라고 하고, 이 지점에서 $z/H=4$ 위치되는 곳을 곡덕트 유입구라고 정의하였다. 곡덕트의 곡률비(curvature ratio) R_c/H 는 3.375 이며, 이는 선행연구에서 다루어진 곡덕트의 곡률비와 같도록 설정하였다.^(1,3,4,8)

2.1 수치해석 조건 및 격자계

본 연구에서 사용된 유동조건은 레이놀즈 수가 56,690 이며 작동유체로 공기를 사용하였으며 밀도 (ρ)는 1.265 kg/m^3 이고, 점성계수(μ)는 $1.983 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ 이다.

계산시간의 효율을 높이기 위해서 완전발달된 유동조건이 $z/H=4$ 위치에서 유입되도록 하였다. 유입되는 유동조건은 $80D_h$ 에 해당하는 직덕트의 유동을 직접 풀어서 적용하였고, 기존의 실험값을 유입시키는 경우와 비교하여 큰 차이가 없음을 확인하고 사용하였다. 또한, 비정상 계산에서는 유입조건으로 인한 계산격자가 증가하게 되면 계산 시간이 증가하게 되므로 이를 효율적으로 만들기 위해서 긴 직덕트 내의 유동장을 풀어서 결과값을 초기 유동조건으로 입력하였다.

수치계산의 경계조건은 벽에 대해서는 비활조건(no slip condition)을 주고 출구에서는 노이만 경계

조건(Neumann condition)을 주었다. 출구조건은 각도 270° 의 유동이 출구의 영향을 받지 않도록 270° 지점에서 $z/H=3$ 만큼 떨어진 하류지점에 설정하였다. 출구조건은 반복확인 결과 $3Dh$ 정도 거리에서 이상 없음을 확인하여 사용하였다.

본 연구에 사용된 격자계의 단면은 Fig. 2 와 같이 나타내었다. 사용된 격자는 유동단면에 대해서 $N_x \times N_y = 101 \times 101$, 주유동 방향에 대해서는 $N_z=214$ 개를 주었다. 전체 계산에 사용된 격자의 수는 2,183,014 개이며, 정육면체 정렬격자로 구성하였다. 벽면 인접부에서는 조밀격자를 주어 벽에서 첫 번째 격자의 값이 1 보다 작도록 유지하였다. 초기 유입구의 위치($x/H=0.5, z/H=4$)에서 벽마찰 속도(u^+)를 구해, 이를 이용하여 계산된 최소격자 $\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+$ 는 0.32, 0.32, 32 이다. 본 연구에서 사용되는 DES는 비정상 계산기법이므로 시간간격(time-step)은 설정이 필요하며, CFL (Courant Friedrichs Lewy) 수에 맞추어 0.02 ~ 0.1H/ U_b 로 설정하였다. 최소 계산간격은 약 $2.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{ s}$ 이며 전체계산 시간은 0.5s로 설정하여 계산을 수행하였다.

Table 1 은 270° 곡덕트의 유동조건과 주요 치수를 정리하여 나타낸 것이다.

2.2 수치해석 방법과 난류모형

본 연구의 계산은 상용프로그램인 CFX 10.0 과 CFX 11.0⁽¹³⁾을 가지고 계산하였으며, 슈퍼 컴퓨터(IBM-690)와 병렬 컴퓨터를 이용하여 수행되었다. 곡덕트의 수치해석을 위해 본 연구에서 채택한 난류모형은 RANS에서는 $k-\omega$ 모형⁽¹³⁾을 선택하였으며 DES에서는 SST 모형을 기반으로 만들어진 DES⁽¹¹⁻¹³⁾모형을 선택하였다.

본 연구에서 사용되는 DES 기법은 Strelets⁽¹¹⁾과 Travin *et al.*⁽¹²⁾에 의해 제안되었다. RANS 기법으로는 SST모형을 사용하면서 LES 기법이 혼합된 기법이다. DES에서 RANS 영역에서는 사용하게 되는 SST 모형은 Menter *et al.*⁽¹⁴⁾에 의해서 개발된 모

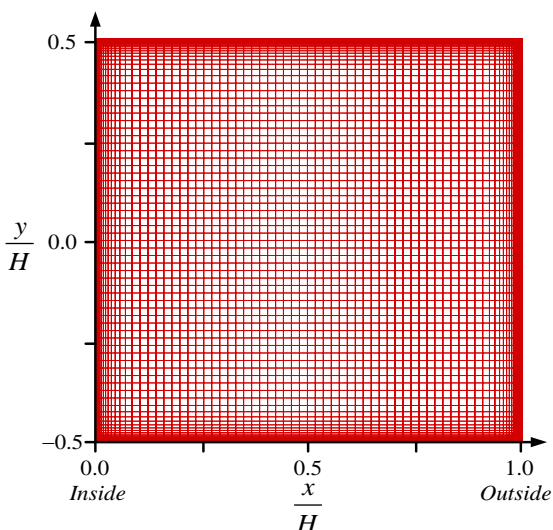


Fig. 2 Computational mesh of the cross section

Table 1 Geometrical parameters

Descriptions		Unit	Value
Mean velocity	U_b	m/s	9.996
Reynolds number	Re		56,690
Duct Height	H	m	0.0889
Inner radius of curvature	Ri	m	0.254
Outer radius of curvature	Ro	m	0.343
Center radius of curvature	Rc	m	0.2985

형이다. 이 SST모형은 $k-\omega$ 모형을 기본으로 개발된 것으로 $k-\omega$ 모형에서 난류 와점성계수(ν_t)는 식 (1)과 같이 난류운동 에너지(turbulent kinetic energy, k)와 비소멸률(specific dissipation rate, ω)의 조합으로 표현된다. $k-\omega$ 모형을 사용하는 경우 와점성계수가 실제보다 크게 계산되어 박리(wake)유동 및 와류의 계산이 부정확성을 보여주는 경향이 있다.⁽¹⁴⁾ 이러한 문제를 해결하기 위해서 Menter *et al.*⁽¹⁴⁾가 제안한 SST모형에서는 식 (2)와 같이 난류 와점성계수를 수정하여 사용하였다.

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \quad (1)$$

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (2)$$

식 (2)에서 $a_1 = 0.31$, S 는 전단 변형률 텐서(shear strain rate tensor)를 의미하고, F_2 은 혼합함수(blending function)로 정의되며 벽 경계층에서 최대 값을 조절하는 함수이다. 이 혼합함수 F_2 는 식 (3)으로 표현되며, 여기서 $\beta' = 0.09$, y 는 가장 가까운 벽까지의 거리이고 ν 는 점성계수를 의미한다.

$$F_2 = \tanh \left(\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right) \quad (3)$$

DES는 RANS 모형인 SST모형과 LES 기법을 혼합하는 방법이다. SST 모형에 의해 예측된 난류길이척도(turbulent length scale, l_t) 값이 국부격자척도(local grid scale)보다 크게 되면 계산 기법을 RANS에서 LES로 바꾸면서 계산하는 혼합형태의 계산기법이다. 국부격자척도는 본 연구에서 사용된 DES 모형에서는 식(4)처럼 $C_{DES} \Delta$ 로 표현된다.⁽¹³⁾ 난류길이척도는 난류운동에너지 방정식의 소멸항(ε)의 계산에 사용되는데 DES모형에서는 이것을 식(4)와 같이 국부격자척도로 바꾸어 사용하게 된다.

$$\varepsilon = \beta^* k \omega = \frac{k^{3/2}}{l_t} \sim \frac{k^{3/2}}{C_{DES} \Delta} \quad (4)$$

본 연구에서 사용된 $C_{DES} \Delta$ 값은 0.61 이다.⁽¹³⁾ DES는 난류 운동에너지 방정식의 소멸항에 나타나는 난류길이척도(l_t)를 수정하여, $C_{DES} \Delta$ 가 값보다 작으면 RANS기법을 사용하고, 난류길이척도(l_t)가 $C_{DES} \Delta$ 보다 큰 유동영역에서는 LES기법을 사용하게 된다.

3. 결과 및 토의

본 연구에서 계산된 값들을 Chang *et al.*⁽³⁾이 180° 곡덕트에 대하여 측정한 실험결과와 조 등⁽⁸⁾이 270° 곡덕트에 대하여 열선 유속계를 이용하여 측정한 실험결과와 비교하여 수치해의 타당성과 그 유동특성을 검토하였다.

3.1 격자계의 타당성 검토

본 연구에서 사용된 DES기법은 벽 근처에서는 RANS에 의한 SST모형을 사용하고, 난류길이척도에 따라 LES를 사용하게 되므로 격자계에 따른 의존도가 크다고 할 수 있다. 사용된 계산 격자계에 대한 타당성 검토를 위해 가장 대표적 방법으로 벽 근처에서의 무차원 속도 u^+ 와 벽에서 무차원화된 거리 y^+ 의 관계를 분석하는 방법을 통해 계산격자의 타당성을 확인하였다.

Fig. 3 은 최종 결정된 격자계의 타당성을 나타내기 위해서 조밀 격자계를 사용하지 않은 경우, 즉 벽면으로부터 첫 번째 격자의 y_1^+ 가 3.2 인 일반 격자계와 조밀격자를 사용한 y_1^+ 가 0.32 인 격자계를 비교하여 y^+ 값에 따른 무차원 속도 u^+ 의 값을 나타낸 것이다. Fig. 3 에서 비교를 위해 선정된 지점은 곡덕트 입구에 해당하는 각도 0°인 지점 ($z/H=0$, $x/H=0.5$)과 곡덕트 유입구, 즉 각도 0°인 지점을 기준으로 $z/H=-4$ 되는 지점에서 y^+ 에 따른 u^+ 값을 같이 나타내었다.

조밀 격자계를 사용한 경우의 u^+ 값이 $y^+ < 10$ 인 점성저층에서 $u^+ = y^+$ 의 경향을 보여주고 있으며, $y^+ > 100$ 인 대수영역(logarithmic region)에서도 대수곡선에 비교적 잘 일치하고 있는 것을 보여주고 있으므로 본 연구에서 사용된 격자계가 벽 근처의 점성영향을 잘 반영하고 있다고 할 수 있다.

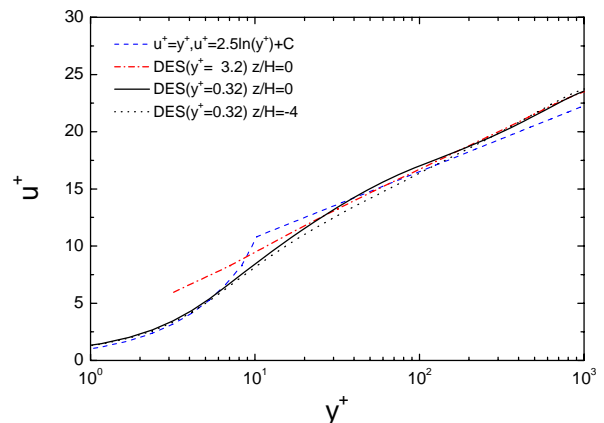


Fig. 3 Comparison of wall skin velocity profiles

3.2 평균속도 분포

정사각 단면을 갖는 곡덕트 유동장은 곡률에 의한 원심력에 의해 유동단면에서 $y/H=0$ 을 기준으로 상하 대칭의 2 차 유동이 발생하며, 이 2 차 유동이 주유동 속도에 대해 2 중 극대형상을 발생시키는 매우 복잡한 유동장이 된다. 이 유동장에 대한 해석의 관점은 곡덕트의 곡률 원심력에 의해 발생한 2 차 유동의 형태변화를 난류모형들이 얼마나 잘 예측할 수 있는가를 살펴보는 것과 2 차 유동의 와류가 여러 개의 군소와류로 나누어질 때 형성되는 주유동 방향 속도분포에 대한 예측의 정확성을 알아보는 것이다.

Fig. 4 는 유동단면의 중앙($y/H=0$)에서 주유동 방향 속도 (U_θ)를 초기 입구단면 평균속도 (U_b)로 무차원하여 곡덕트의 유동방향에 따라 45° 단위로 증가시키면서 나타낸 것이다. $x/H=0$ 인 지점이 곡덕트의 내측 벽(inside wall)을 의미하고, $x/H=1$ 이 외측 벽(outside wall)을 의미한다. 곡덕트의 $z/H=-4$ 지점에서는 좌우대칭인 완전 발달된 형태의 직덕트 유동이 유입되지만 이미 각도 0° 에서 곡덕트로 유입되는 주유동 속도는 곡률의 영향으로 내벽 쪽으로 가속되면서, 내측 벽($x/H=0$)으로 기울어진 형태를 보여주고 있다.

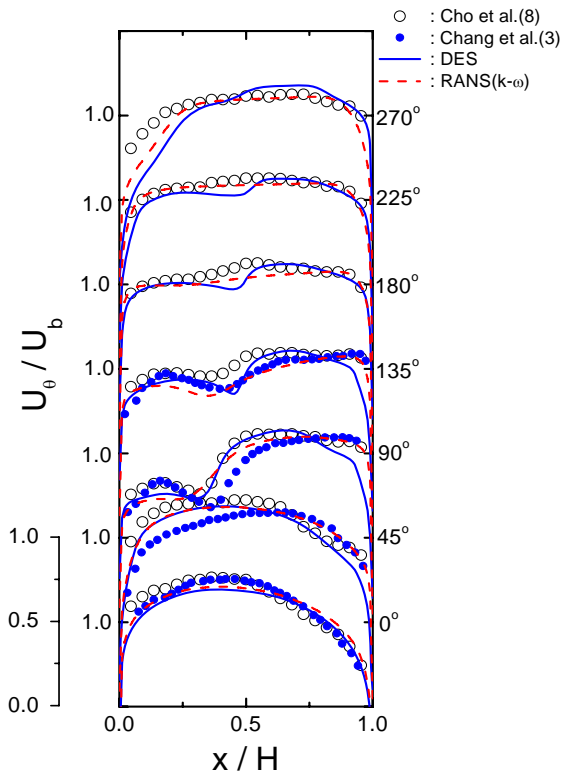


Fig. 4 Comparison of predicted and measured streamwise mean velocity (U_θ/U_b) profiles

Fig. 4 의 결과를 보면, 주방향 속도분포에 대한 수치해석 결과계산에 사용된 DES와 RANS($k-\omega$)역시 Chang et al.(3)과 조 등(8)의 실험결과와 잘 예측하고 있는 것을 보여주고 있다. DES 결과가 90° 이후 속도 구배 변화를 근사하게 예측하고 있으며 주유동의 최고치가 점차적으로 외벽 쪽으로 이동하는 모습을 예측하고 있는 것을 보여주고 있다. 0° 구간에서는 DES와 RANS($k-\omega$)의 계산결과를 실험값과 비교하였을 때 최대 7%이내의 평균 오차 값을 보여주었다.

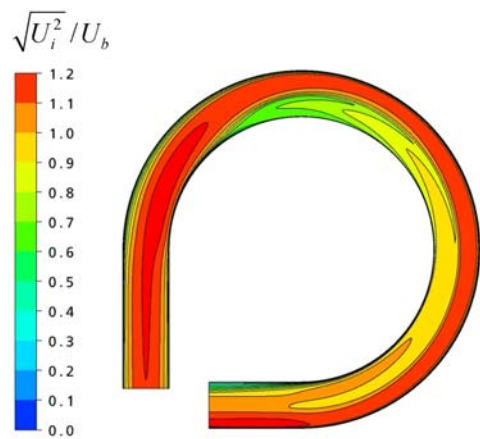


Fig. 5 Normalized total velocity contour of the plane at $y/H=0$

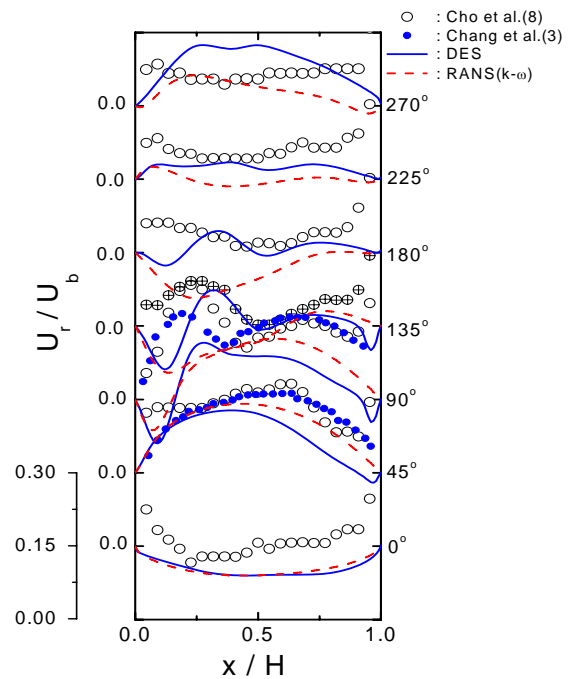


Fig. 6 Comparison of predicted and measured radial direction velocity (U_r/U_b) profiles

Fig. 5는 곡덕트의 대칭면($y/H=0$)에서 DES로 계산된 전체속도를 주유동 방향 평균속도에 대해 무차원하여 등속도선도를 나타낸 것이다. Fig. 5의 등속도선도역시 Fig. 4에서 나타낸 것과 같이 주유동 평균속도분포는 곡덕트의 하류로 갈수록 곡덕트의 내벽에서 외벽쪽으로 평균속도 분포가 크게 형성되는 것을 보여주고 있다. Fig. 6은 반경방향 속도 (U_r)을 입구단면 평균속도 (U_b)로 무차원한 값을 45° 씩 각도를 증가시켜서 나타낸 것이다. 주유동방향 속도분포에서 보여주는 것과 달리 두 모형에 의한 반경방향 속도분포 계산결과는 90° 구간 이후 실험값과는 차이를 보이고 있다. 벽면근처에서 실험값들과 비교하여 최대 28% 정도의 정량적 오차를 나타내고 있으며, 벽을 제외한 구간에서는 약 5~10%의 정량적 오차값을 나타낸다. DES의 결과가 RANS($k-\omega$)의 결과에 비하여 급격한 유동의 변화를 수반하는 90° 구간 이후 실험결과에 비교적 접근하는 모습을 보여주고 있다.

3.3 난류요동성분과 난류운동에너지

Fig. 7은 주유동 방향의 난류요동성분(u_θ')을 곡덕트의 유동방향에 따라 나타낸 것이다.

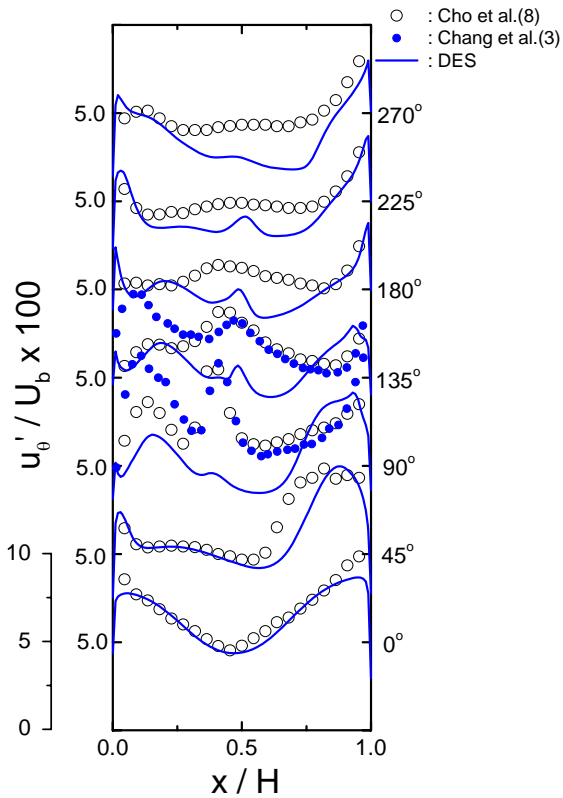


Fig. 7 Comparison of predicted and measured turbulent intensity(u_θ'/U_b)profiles

난류요동성분은 RANS에서 계산되어지지 않기 때문에 DES의 결과를 실험값과 같이 도시하였다. 주방향 난류성분 값은 90° 를 넘어서면서 덕트 중심부에서 크게 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 속도 구배가 커지므로 발생하는 것으로 예측된다.

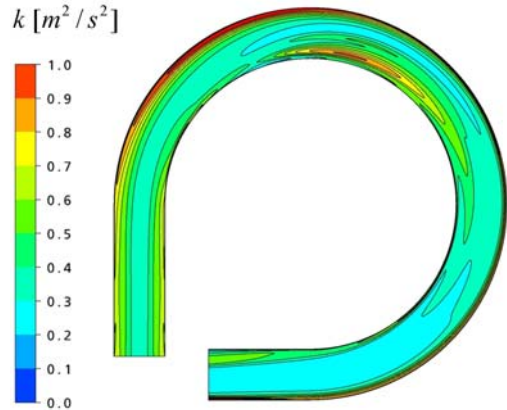


Fig. 8 Turbulent kinetic energy contour of the plane at $y/H=0$

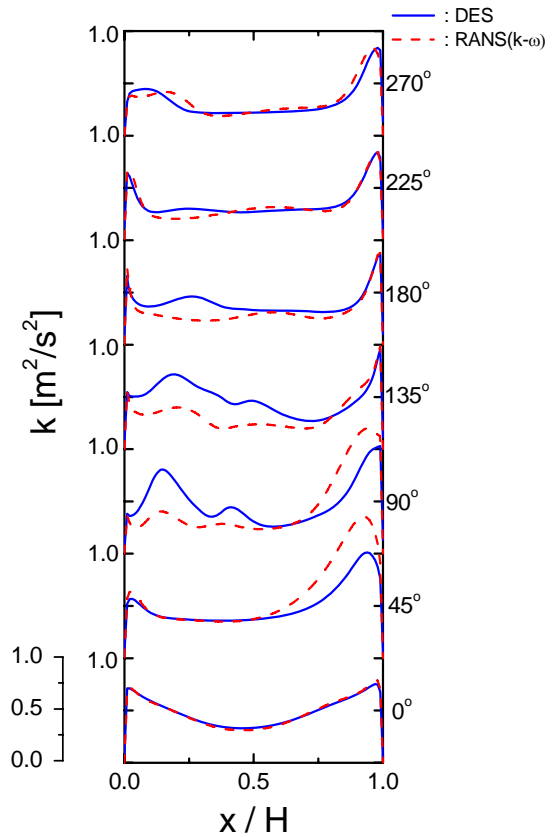


Fig. 9 Turbulent kinetic energy profiles of DES and RANS($k-\omega$)

Fig. 8 은 DES 로 얻어진 대칭면($y/H=0$)에서 계산된 난류운동에너지 분포를 나타낸 것이다. 이 분포를 보면 전체적으로 외벽 쪽으로 난류운동에너지가 크며, 90° 와 135° 까지 구간에서는 내벽 쪽에서도 난류운동에너지 값이 커지는 것을 보여주고 있다.

Fig. 9 는 각도 별 구간에 따라 RANS($k-\omega$)의 난류운동에너지와 DES 의 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 두 결과 모두 외벽 쪽으로 갈수록 난류운동에너지가 크게 나타나는 것을 보여주고 있다.

DES 결과는 Fig. 4 에서 나타낸 것과 같이 주유동 분포가 2 중 극대가 최대 형성되는 90° 구간부터 135° 구간까지 내측 벽 쪽에 형성되는 난류운동에너지도 상대적으로 크게 예측되는 것을 보여주고 있다. 0° 구간과 45° 구간에서 DES에 의한 예측결과는 최대 5%의 정량적 오차값을 가지면서 실험값과 일치하고 있다. 90° 구간을 지나면서 조 등⁽⁸⁾의 실험값에 비하여 최대 28%의 정량적 오차값을 나타내기는 하지만, Chang *et al.*⁽³⁾과 조 등⁽⁸⁾의 실험결과에서 나타나고 있는 135° 및 180° 구간에서 덕트 중앙부에 해당하는 $x/H=0.5$ 지점에서 주방향 난류요동성분들이 크게 상승하고 있는 경향을 모사하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고 곡덕트의 하류부분인 225° 구간 이후에도 실험값과 유사한 예측분포를 보여주고 있다.

3.4 2차 유동(Secondary flow)

Fig. 10 은 0° , 90° , 180° 및 270° 구간에서 DES 및 RANS($k-\omega$)의 2차 유동의 벡터선도와 주유동 속도(U_θ/U_b)의 등속도선도를 비교하여 나타낸 것이다. 두 계산 결과에서 모두 90° 구간의 유동단면에 강력한 상하 대칭의 와류 2 개가 형성된 것을 보여주고 있으며, 180° 구간의 유동단면에서는 이 와류들이 여러 개의 와류로 나누어진 것을 보여주고 있다. 180° 구간의 유동단면의 주와류 눈에서의 와류강도는 90° 구간에 비해서 상당히 약해진 것을 보여주고 있으며, 이것은 Fig. 4 의 90° 구간에서 나타난 주유동 속도의 2 중 극대형상이 유동장의 후반부로 갈수록 속도골의 깊이가 서서히 얕아지면서 일반적인 주유동 속도 분포로 복원되기 때문이다. 180° 구간의 유동단면을 보면 DES 의 결과가 RANS($k-\omega$)의 결과에 비해서 주유동 분포가 외벽 쪽에서 더 크게 나타나는 것을 보여주고 있다. 90° 구간에서 발생된 2차유동이 더 작은 와류로 분리되면서 외벽 쪽으로 밀어내는 형태를 보여주고 있다. 이러한 현상은 Fig. 5 의 90° 구간에서 반경방향

속도분포를 살펴보면 내측 벽에서 크게 증가하는 경향과도 잘 일치한다. Fig. 4 와 Fig. 10 로부터 2차 유동에 의한 원심력으로 유동이 외벽 쪽으로 치우쳐 흐름으로서 외벽 인접부의 주유동 속도가 증가되고 내벽 쪽 중심부분의 속도가 낮아지는 경향을 보인다. 즉, Fig. 10 의 선도에서 와류 눈에서의 강도가 강할수록 Fig. 4 에서 주유동 속도의 골이 깊어지게 되는데, 이는 와류강도가 강할수록 와류에 의한 원심력이 커져 유동이 바깥쪽으로 이동하였기 때문이다.

Fig. 10 의 270° 유동단면에서 DES 결과를 보면 외벽 쪽에서 작은 와류가 발생하는 것을 볼 수 있는데 이 부분은 RANS 결과에서는 발견할 수 없었던 와류 형태이므로 비정상적인 유동특성으로 예측되어진다. 이 부분에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다고 생각된다.

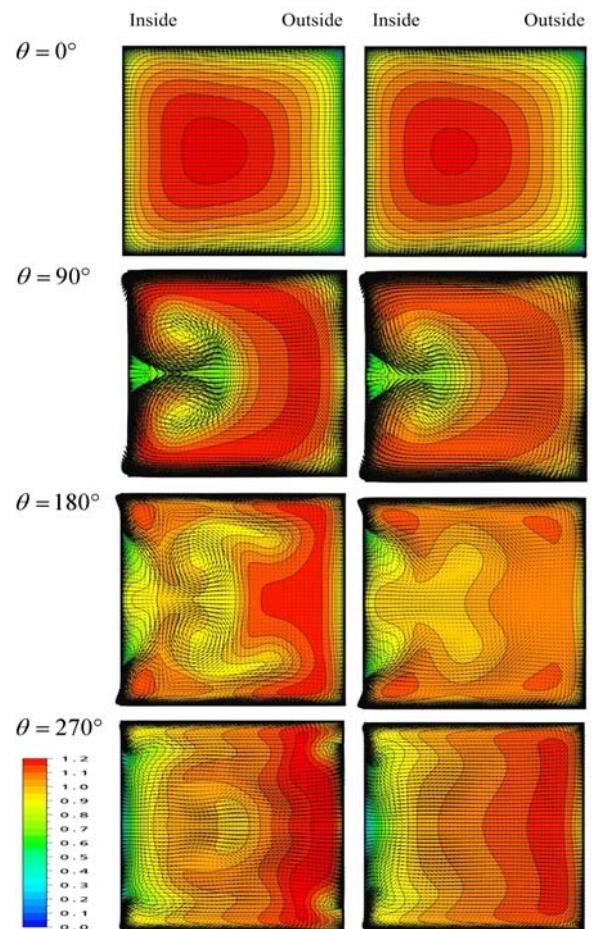


Fig. 10 Normalized total velocity contours and secondary flow vector profiles of DES and RANS($k-\omega$) at the cross section with the angle 0° , 90° , 180° and 270°

4. 결 론

본 연구에서는 정사각 단면을 갖는 270° 곡덕트에서 발달하는 난류유동에 대하여 DES와 RANS($k-\omega$)를 이용하여 수치해석을 수행하였고, 그 계산된 결과를 180° 곡덕트⁽³⁾ 및 270° 곡덕트⁽⁸⁾에 관한 실험결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 주유동방향 평균속도 분포의 경우 DES 및 RANS에 의해 예측된 결과들은 모두 실험값과 잘 일치하였으며, 곡덕트 입구부에서 내벽 쪽으로 치우치던 흐름이 90°구간 이후에는 외벽 쪽으로 밀려가는 유동특성을 확인할 수 있었다. 반경방향 속도분포의 경우 유동변화가 심한 90°와 135° 구간에서 DES에 의한 해석결과가 RANS($k-\omega$)에 비해 실험값에 근접하고 있는 것을 확인하였다.

(2) DES로 직접 계산된 난류요동성분은 실험값과 다소 차이는 있지만 90°와 135°구간의 중앙부분에서 실험값과 같이 크게 예측되는 경향을 보여주고 있다.

(3) 곡덕트에 대한 유동특성 분석을 통해 DES에 의한 수치적 접근방법이 비교적 타당성이 있음을 확인하였다. 그러나 공학적인 문제해결을 위한 또 하나의 수치해석 도구로서 DES가 활용되기 위해서는 보다 다양한 유동장에 대하여 해석과 이에 대한 분석이 필요하다고 본다.

후 기

본 연구는 한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅센터(KSC-2007-S00-1023)의 지원을 통해 수행되었음.

참고문헌

- (1) Choi, Y.D. and Lee, G.H., 1998, "Measurement of Turbulent Flows Characteristics in a Circular Duct with a 180 Degree Bend by Hot Wire Anemometer," *Proc. of the KSME*, pp. 365~370.
- (2) Seo, J.S., Kim, W.K. and Choi, Y.D., 1999, "A Measurement on the Turbulent Flow of Variable Cross

- Sectioned 180° Bend by using Laser Doppler Velocimetry," *Proc. of the KSME*, pp. 68~73.
- (3) 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," *PhysicoChemical Hydrodynamics*, Vol. 4, No. 3, pp. 243~269.
- (4) Kim, M.H., Yum, S.H., Shin, J.K. and Choi, Y.D., 1994, "Study on the Second Moment Turbulence Model in a Square Sectioned 180° Bend," *Trans. of the KSME*, Vol. 18, No. 5, pp. 1203~1217.
- (5) Sugiyama, H. and Hitomi, D., 2005, "Numerical Analysis of Developing Turbulent Flow in a 180° Bend Tube by an Algebraic Reynolds Stress Model," *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 47, No. 12, pp. 1431~1449.
- (6) Myong, H.K., 2006, "Numerical Simulation of Developing Turbulent Flow in a Circular Pipe of 180° Bend," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 30, No. 10, pp. 966~972.
- (7) Boiron, O., Deplano, V. and Pelissier, R., 2007, "Experimental and Numerical Studies on the Starting Effect on the Secondary Flow in a Bend," *J. of Fluid Mechanics*, 574, pp. 109~129.
- (8) Cho, S.H., Choi, Y.D. and Lee, G.H., 2000, "Measurement of Turbulent Flows in a Square Sectioned 270° Bend," *Proc. of the KSME*, Vol. 2, No. 2, pp. 467~472.
- (9) Spalart, P.R., 2004, "Topics in Detached Eddy Simulation," *Int. Conf. on Computational Fluid Dynamics*
- (10) Squires, K.D., Forsythe, J.R., Spalart, P.R., 2001, "Detached Eddy Simulation of the Separated Flow Around a Fore Body Cross-Section," *Direct and Large-Eddy Simulation IV*, pp. 481~500.
- (11) Strelets, M., 2001, "Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows," *AIAA Paper 2001-0879*, 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV.
- (12) Travin, A., Shur, M., Strelets, M. and Spalart, P.R., 2000, "Detached-Eddy Simulations Past a Circular Cylinder. Flow," *Turbulence and Combustion*, Vol. 63, No. 1, pp. 293~313.
- (13) Ansys Inc., 2006, *Ansys CFX-Solver 10.0 User manual*
- (14) Menter, F.R., Kuntz, M. and Langtry, R., 2003, "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model," *Turbulence Heat and Mass Transfer 4*, pp. 625~632.