



모렐 식을 갖는 풍동수축부의 내부유동장 특성에 대한 수치해석 Numerical Analysis on the Internal Flow Field Characteristics of Wind Tunnel Contractions with Morel's Equation

김장권*† · 오석형**
 Jang-Kweon Kim*† and Seok-Hyung Oh**

(Received 29 June 2017, Revision received 19 December 2017, Accepted 20 December 2017)

Abstract: The steady-state, incompressible and three-dimensional numerical analysis was carried out to evaluate the internal flow fields characteristics of wind tunnel contractions made by Morel's curve equations. The turbulence model used in this study is a realizable k-ε well known to be excellent for predicting the performance of the flow separation and recirculation flow as well as the boundary layer with rotation and strong back pressure gradient. As a results, when the flow passes through the interior space of the analytical models, the flow resistance at the inlet of the plenum chamber is the largest at $Z_m=300, 400$ mm, but the smallest at $Z_m=700$ mm. The maximum turbulence intensity in the test section is about 2.5% when calculated by the homogeneous flow, so it is improved by about 75% compared to the 10% turbulence intensity at the inlet of the plenum chamber due to the contraction.

Key Words : Boundary Layer Thickness, Contraction, Morel's Equation, Subsonic Wind Tunnel

— 기 호 설 명 —

C_μ	: 와점성계수(=0.09) [-]	V_z	: 유동축방향의 평균속도성분 [m/s]
D_e	: 수축부 출구 높이 [m]	$(V_z)_{\max}$: 유동축방향의 최대평균속도성분 [m/s]
D_i	: 수축부 입구 높이 [m]	v_z	: 유동축방향의 변동속도성분 [m/s]
k	: 난류운동에너지 [m^2/s^2]	Z	: 유동 축방향의 거리 및 좌표 [m]
L	: 수축부 길이 [m]	Z_m	: 두 곡선들을 연결하는 Z의 위치 [m]
R	: 수축부 높이 및 좌표 [m]	ϵ	: 난류소산에너지 [m^2/s^3]
Re	: 레이놀즈(Reynolds) 수 [-]		
V_i	: 수축부 입구 평균속도 [m/s]		
T_i	: 수축부 입구 난류강도(=10%) [-]		

1. 서 론

아음속풍동(subsonic wind tunnel)의 시험부(test section)는 보다 균일하고, 상대적으로 가속된 축방

*† 김장권(교신저자) : 군산대학교 동력기계시스템공학과
 E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848

** 오석형 : 군산대학교 기계공학과

*† Jang-Kweon Kim(corresponding author) : Dept. of Power System Engineering, Kunsan National University.

E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848

**Seok-Hyung Oh : School of Mechanical Engineering, Kunsan National University.

향 속도분포와 얇은 경계층두께 및 매우 낮은 난류수준의 성능들을 필요로 하기 때문에, 수축부(contraction)가 풍동의 중요한 요소로서 사용되어 보통 허니콤(honeycomb)과 시험부 사이에 설치된다¹⁻⁷⁾. 한편, 풍동에서 사용하는 수축부는 길이와 면적비에 따라 매우 민감한 성능을 갖게 된다. 즉, 수축부가 제한된 짧은 길이를 갖게 되면, 출구에서 유동박리에 의한 역압력기울기를 초래하여 시험부에서 경계층두께가 커지거나 속도분포 및 난류강도의 불균일성이 발생할 수도 있다¹⁻⁴⁾. 또 Downie 등²⁾은 수축부의 입출구 면적비가 5보다 작으면, 유동박리를 피하는 노력이 더 필요하다고 언급하였다. 또 Morel⁵⁾은 수축부 면적비가 4보다 더 커질수록 수축부 길이는 더 짧게 할 수 있다고 언급하였으며, 입구직경(높이)에 대한 길이비는 0.75 ~ 1.25 사이에 둔다고 하였다. 반면에 실제 풍동에서는 적절한 격자(mesh)크기를 갖는 다수의 스크린(screen)들과 허니콤을 사용함으로써 속도의 균일성이나 난류강도를 낮출 수 있기 때문에, 길이나 면적비는 더 조정할 수 있다고 본다.

현재까지 알려진 아음속풍동수축부나 노즐에서 많이 쓰이는 형상 식들은 여러 가지가 있지만, Tulapurkara 등⁴⁾은 퍼텐셜(potential) 유동에 대한

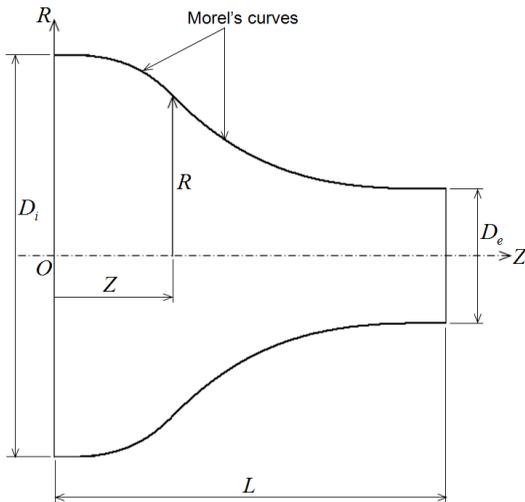


Fig. 1 Definition of Morel's contraction curves

수치 해석에 근거하여 얻어진 Morel 식의 수축부 형상이 출구의 속도 분포에서 작은 역압력기울기 및 낮은 불균일성을 제공한다고 실험적으로 확인하였다. 한편, Morel의 곡선은 Fig. 1과 같이 식 (1)과 식 (2)에 의해 얻어진다. 이때, 수축부의 곡선 형상은 두 개의 곡선들을 연결해주는 위치 Z_m 에 따라 달라진다.

$$R = \frac{D_c}{2} + \frac{(D_i - D_e)}{2} \left[1 - \left(\frac{L}{Z_m} \right)^2 \left(\frac{Z}{L} \right)^3 \right] \quad (\text{for } Z \leq Z_m) \quad (1)$$

$$R = \frac{D_c}{2} + \frac{(D_i - D_e)}{2} \left[\frac{\left(1 - \frac{Z}{L} \right)^3}{\left(1 - \frac{Z_m}{L} \right)^2} \right] \quad (\text{for } Z > Z_m) \quad (2)$$

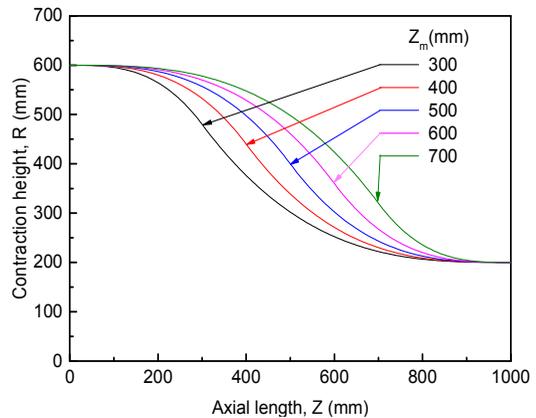


Fig. 2 Morel's contraction curves with different Z_m

이번 연구에서는 Fig. 2와 같이 수축부의 축방향 길이를 1000 mm로 고정한 상태에서 Z_m 의 위치를 300 mm에서 수축부 출구 쪽으로 100 mm씩 700 mm까지 이동시켜 얻어진 5가지의 수축부 형상들이 갖는 유동장 특성을 수치해석을 통해 파악해 보고자 한다. 수치해석에는 상용소프트웨어인 SC/Tetra(ver.12)⁸⁾를 이용하여 3차원, 비압축성, 정상상태에서 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 수정한 Realizable $k-\epsilon$ ⁸⁾을 사용하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 3은 $Z_m=300$ mm의 수축부를 통과하는 내부 유동장을 해석하기 위해 설정한 기하학적 형상과 크기를 나타내는 그림이다. 여기서 기하학적으로 원점인 정4각단면의 수축부 입구에는 가로, 세로 길이가 각각 1200 mm, 길이가 1000 mm인 정류실(plenum chamber)을 붙였으며, 또 수축부 출구에는 가로, 세로길이가 각각 400 mm, 길이가 1000 mm인 시험부를 붙여 전체 유동해석 모델로 만들었다. 한편, 나머지 4개의 수축부 형상들을 갖는 유동해석모델들도 같은 방식을 취하였다^{9,10)}.

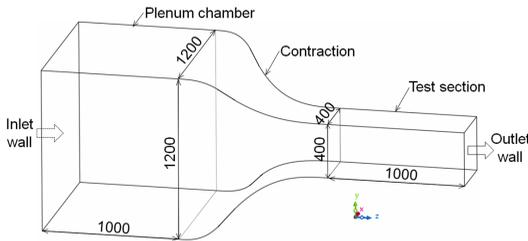


Fig. 3 Geometry configuration for analyzing model with $Z_m=300$ mm

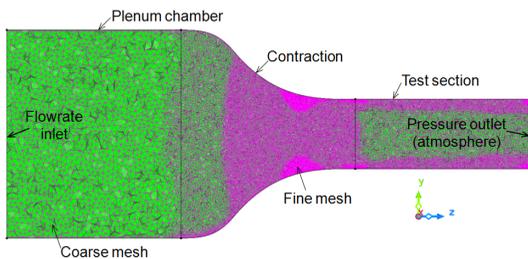


Fig. 4 Mesh configuration for numerical analysis with $Z_m=300$ mm

Fig. 4는 Fig. 3의 계산영역을 격자로 나타낸 그림이다. 여기서 수축부는 상용 소프트웨어인 CATIA(V5R18)로 모델링하였으며, 수축부에 붙인 정류실과 시험부는 SC/Tetra의 전처리 기능으로 만들었다. 특히 격자생성은 해석결과에 따라 격자

크기를 자동으로 맞춰주는 격자적응해석(mesh adaptation analysis) 기능을 이용하였다. 그 결과, 급격한 속도기울기에서 격자는 그 크기가 더 미세하게 형성된 것을 Fig. 4에서 볼 수 있다. 이때, 격자의 총 요소(element)수는 1000만개로 하고, 무차원 벽두께(y^+)는 50, 벽두께 변화율은 1.1, 프리즘층(prism layer)은 2개인 SC/Tetra의 기본조건들을 반영하였다^{9,10)}.

2.2 수치기법

Fig. 3에서 적용한 경계조건들을 살펴보면, 해석모델 모든 벽면에는 점착(no-slip) 조건을 설정하였으며, 정류실 입구면에서는 시험부의 평균속도가 35 m/s($Re \approx 9.265 \times 10^5$)가 되도록 질량유량 6.7536 kg/s를 사용하였다. 이때, 초기 난류운동에너지와 난류소산에너지는 난류강도 10%를 갖는 완전히 발달한 유동조건으로 간주하여 식 (3)과 식 (4)로 계산한 $k = 0.22685 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $\epsilon = 0.21136 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 을 각각 적용하였다. 또 시험부 출구면은 대기압조건으로 설정하였다^{9,10)}.

$$k = 1.5(V_i \cdot T_i)^2 \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} \cdot k^{1.5}}{0.07D_i} \quad (4)$$

한편, 해의 제어를 위한 운동량 및 난류모델방정식들의 대류항들은 모두 2차 풍상차분법(2nd upwind scheme)으로 이산화하였으며, 확산항들은 초기조건인 Accuracy weighted 기법을 사용하였다⁸⁾. 또한 압력보정방법은 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였으며, 압력항 및 모든 변수들의 완화계수는 초기상태의 값들을 반영하였다. 그리고 해의 수렴 조건은 모든 변수들의 잔류값이 1.0×10^{-6} 일 때로 설정하였다^{9,10)}.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 축방향 평균속도성분의 분포

Fig. 5는 X=Y=0 mm인 5가지 수축부를 갖는 유

동해석모델 중심부에서 유동 축방향(Z) 거리증가에 따라 얻어진 축방향 평균속도성분(V_z)의 분포를 나타낸 그림이다. Z_m 의 크기변화에 관계없이 축방향 평균속도성분의 크기는 정류실 입구에서 최소값을 갖다가 수축부에서 가속되고 시험부에서 최대값을 갖는 공통성을 보여준다. 그러나 이 같은 현상은 Z_m 의 크기 증가에 따라 축방향 하류 쪽으로 이동해 나타남을 알 수 있다. 이것은 Fig. 2에서와 같이 Z_m 이 증가함에 따라 수축부형상의 곡률부가 축방향 하류 쪽으로 이동함으로써 유동이 수축부를 통과할 때 걸리는 압력저항이 점차 작아져 나타난 현상이다. 이 같은 사실은 Fig. 6에서도 확인할 수 있다. 즉, Fig. 6은 질량유

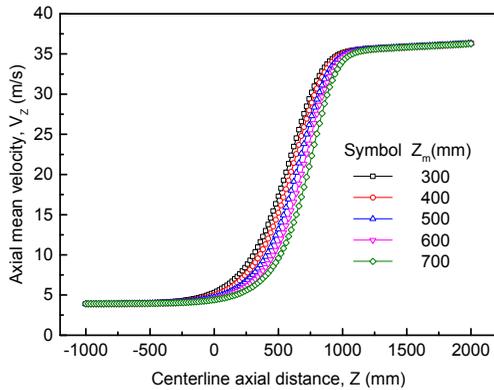


Fig. 5 Axial mean velocity profiles along the centerline

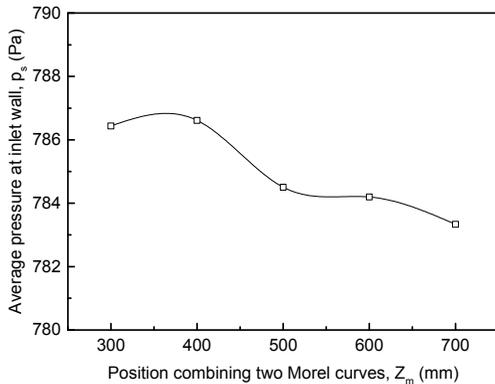


Fig. 6 Average pressure profiles at inlet wall with different Z_m

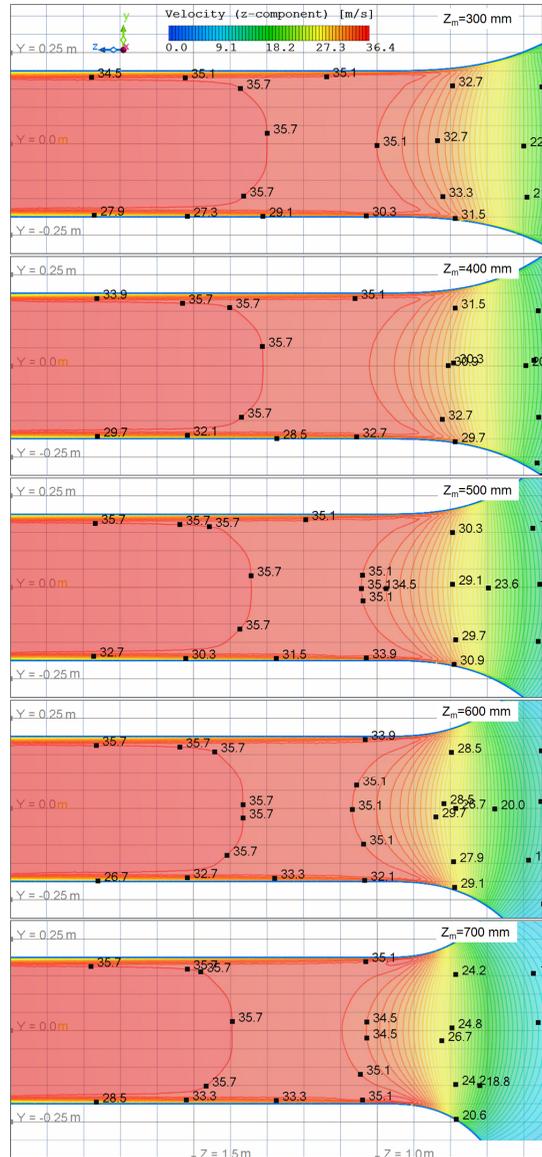


Fig. 7 Axial mean velocity contours in test section

량 6.7536 kg/s이 Fig. 3의 유동해석모델들의 내부공간을 통과할 때 정류실 입구부에서 작용하는 평균압력을 나타낸 그림이다. 평균압력은 $Z_m=300, 400$ mm에서 가장 크게 나타나 유동저항이 가장 크며, $Z_m=700$ mm에서 가장 작음을 알 수 있다. 결과적으로 $Z_m=500$ mm 이후에서의 Morel 수축부는 상대적으로 유동저항도 작고, 시험부내에서 중

심축 상을 따라 발달하여 최대크기를 갖는 축방향 평균속도성분도 다른 모델들의 경우보다 크게 다르지 않아 사용하기에 적합한 것으로 판단된다. 다만, 유동저항이 가장 작은 $Z_m=700$ mm의 수축부를 사용하는 것은 축방향 평균속도성분의 최대크기가 시험부 내에서 차지하는 하류의 공간이 작아진다는 단점이 존재하지만 그것도 시험부 길이를 적절히 늘려 사용하면 별 문제가 없다고 판단한다.

Fig. 7은 각각의 Z_m 을 갖는 유동모델별로 시험부에서 형성된 축방향 평균속도성분의 크기분포를 최대값 대비 60등분으로 나눠 나타낸 그림이다. Z_m 의 위치가 증가함에 따라 수축부 출구에서 가속된 축방향 평균속도성분의 크기(예를 들면, 35.1 m/s)분포는 벽면을 제외하곤 전형적인 포물선을 나타내며 Fig. 5에서와 같이 시험부 안쪽으로 치우쳐 발달하여 비교적 일정한 공간영역을 차지하고 있다. 또한 시험부 내의 중심부 하류측으로 더욱 평평하게 발달한 축방향 평균속도성분의 크기(예를 들면, 35.7 m/s)분포는 Z_m 의 위치가 증가함에 따라 그 공간영역이 줄어들음을 알 수 있다. 한편, 시험부 벽면에서는 Z_m 의 위치와 관계없이 속도변화의 기울기가 크게 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 각각의 Z_m 을 갖는 유동모델별로 시험부 하류측 위치들에 따라 벽면으로부터 형성된 축방향 평균속도성분의 분포를 나타낸 그림이다. 여기서 시험부는 가로, 세로가 각각 400 mm인 직사각형의 대칭 형상이므로, Fig. 8에서는 수평 중심부(X방향)를 기준으로 Y방향의 높이 200 mm(상단부)에서 아랫방향으로 140 mm까지의 축방향 평균속도성분을 나타내었다. 축방향 평균속도성분의 기울기가 일정하지 않게 나타나는 경계층두께(δ)에 해당하는 높이 구간은 Z_m 의 증가에 따라 점차 증가하여 나타나 있다(Fig. 9 참조). 또 벽면에 매우 근접한 영역에서는 Z_m 에 관계없이 모두 급격한 기울기의 축방향 평균속도성분이 분포되며, 이 속도기울기를 유지하는 최대 속도크기들은 Z_m 의 증가에 따라 감소함을 알 수 있다. 또 급격한 속도기울기를 벗어나 일정한 최대크기를 나타내는

영역에서 축방향 평균속도성분의 편차는 Z_m 의 증가에 따라 증가하며, Fig. 5에서도 알 수 있듯이 최대속도크기 역시 서서히 증가한다.

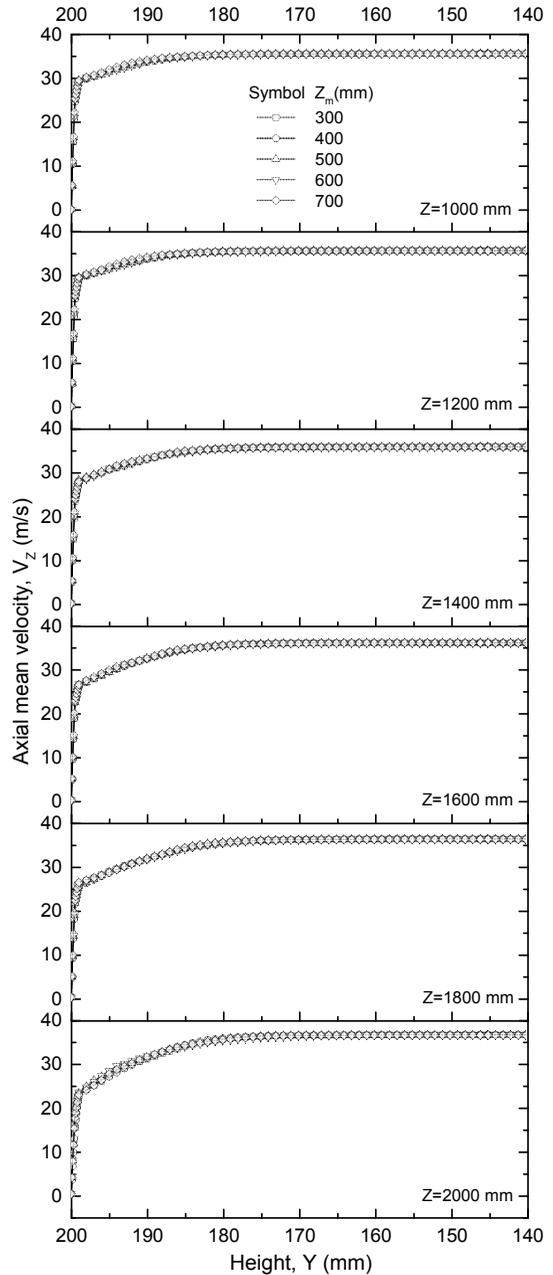


Fig. 8 Axial mean velocity profiles along the height in test section

3.2 경계층두께

Fig. 9는 Fig. 8로부터 얻어진 경계층두께를 나타낸 그림이다. 여기서 경계층두께는 시험부 내에서 균일한 속도에 도달하기 직전의 높이로 결정하였다. Fig. 9에서 경계층두께는 각각의 Z_m 에 따라 시험부 입구 근처에서 특히 들쭉날쭉한 분포를 보이나, 축방향 거리증가에 따라 완만하게 증가하고 있어, 그 분포양상은 근사적으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 참고로 식 (5)의 계수들은 Fig. 9에 나타내었다. 한편, 경계층두께는 Z_m 에 관계없이 시험부 출구에서 최대값으로 약 30 mm를 나타내고 있다.

$$\delta = a + bZ^{0.5} + cZ + dZ^{1.5} + eZ^2 + fZ^{2.5} + gZ^3 \quad (5)$$

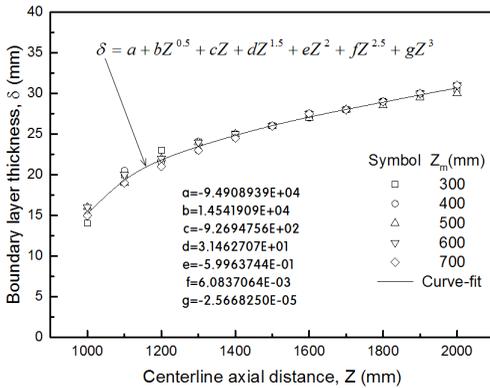


Fig. 9 Boundary layer thickness profiles with different Z_m

3.3 난류운동에너지 및 난류소산율의 분포

Fig. 10은 $X=Y=0$ mm인 5가지 수축부를 갖는 유동해석모델들 중심부에서 축방향 거리증가에 따라 얻어진 난류운동에너지(k)의 분포들을 나타낸 그림이다. 모든 유동해석모델들의 난류운동에너지의 크기는 축방향 거리증가에 따라 정류실 입구에서 수축부 입구 근처까지는 서서히 감소하다가 수축부 입구 근처에서 최소값에 도달한 다음 수축부를 거치면서 급속히 증가하여 시험부에서 최대값에 도달하고, 시험부 출구쪽으로 갈수록 약간 감소해 분포하는 공통점을 보여준다. 다만, 이와 같은 난류운동에너지의 분포양상은 Z_m 의 크

기변화에 따라 축방향 하류 쪽으로 이동해 나타나고 있으며, 특히 시험부 내에서의 난류운동에너지의 크기는 $Z_m=700$ mm의 경우에서 축방향 거리증가에 관계없이 비교적 편차가 작게 나타난다. 한편, 시험부내에서의 난류운동에너지의 크기는 균질성(homogeneous) 유동에 대해서는 $k=3v_z^2/2$ 을 만족하므로, 시험부내의 최대난류강도는 식 (6)으로 계산할 수 있다. 따라서 시험부 내에서 최대난류강도는 약 2.5%로 계산되어 정류실 입구에서 10%보다 수축부로 인해 약 75%가 개선되었다.

$$\frac{\sqrt{v_z^2}}{(V_z)_{\max}} = \frac{1}{(V_z)_{\max}} \sqrt{\frac{2}{3}k} \quad (6)$$

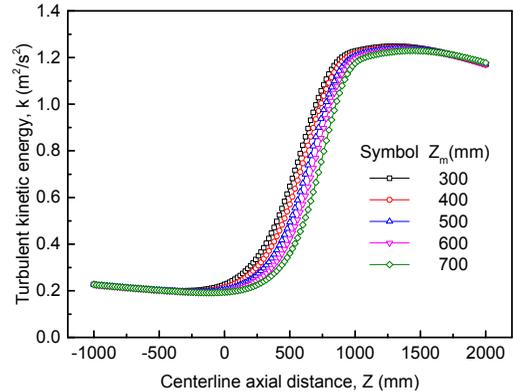


Fig. 10 Turbulent kinetic energy profiles along the centerline

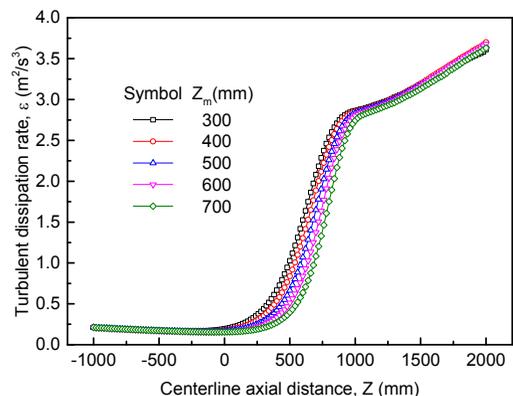


Fig. 11 Turbulent dissipation rate profiles along the centerline

Fig. 11은 $X=Y=0$ mm인 5가지 수축부를 갖는 유동해석모델들 중심부에서 축방향 거리증가에 따라 얻어진 난류소산율(ϵ)의 분포들을 나타낸 그림이다. 정류실에서 수축부 출구 근처까지 난류소산율의 분포는 Z_m 의 크기에 관계없이 난류운동에너지와 매우 유사한 분포경향을 보이고 있으나, 시험부 내에서는 모든 Z_m 의 크기에서 축방향 거리증가에 따라 계속 증가하여 시험부 출구에서 최대값으로 나타난다.

4. 결 론

Morel식을 구성하는 두 개의 곡선들을 연결하는 Z_m 의 위치에 따라 얻어진 5개의 수축부 형상 내부를 흐르는 유동을 3차원, 비압축성, 정상상태에서 Realizable $k-\epsilon$ 의 난류모델로 수치 해석한 결과는 다음과 같다.

1) 정류실 입구에서 최소값의 축방향 평균속도 성분의 크기는 수축부에서 가속되어 시험부에서 최대값을 갖는데, 이 같은 현상은 Z_m 의 크기 증가에 따라 유동 축방향 하류 쪽으로 이동해 나타난다.

2) 유동이 해석모델들의 내부공간을 통과할 때, 정류실 입구에서 작용하는 평균압력은 $Z_m=300, 400$ mm에서 가장 크게 나타나 유동저항이 가장 크며, $Z_m=700$ mm에서 가장 작다.

3) 경계층두께는 각각의 Z_m 에 따라 시험부 입구 근처에서 특히 들쭉날쭉한 분포를 보이나, 축방향 거리증가에 따라 완만하게 증가하여, 시험부 출구에서 최대 약 30 mm를 나타낸다.

4) 시험부 내의 최대난류강도는 균질성유동으로 계산할 때, 약 2.5%로 얻어져 정류실 입구에서 10%보다 수축부로 인해 약 75%가 개선된다.

References

1. R. V. Barrett, 1984, "Design and Performance of a New Low Turbulence Wind Tunnel at Bristol University", Aeronautical Journal, Vol. 88, No.

873, pp. 86-90.
 2. J. H. Downie, R. Jordinson, F. H. Barnes, 1984, "On the Design of Three-Dimensional Wind Tunnel Contractions", Aeronautical Journal, Vol. 88, No. 877, pp. 287-295.
 3. Masatoshi Sano, 1988, "Effects of Screens and Contractions on Wind Tunnel Characteristics(In Japanese)", Journal of the Japanese Society of Mechanical Engineering, Vol. 64, No. 627, pp. 149-155.
 4. E. G. Tulapurkara and V. V. K. Bhalla, 1988, "Experimental Investigation of Morel's Method for Wind Tunnel Contractions", Journal of Fluids Engineering, Vol. 110, pp. 45-47.
 5. T. Morel, 1975, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions", Journal of Fluid Engineering, Vol. 97, pp. 225-233.
 6. A. K. M. F. Hussain and V. Ramjee, 1976, "Effects of the Axisymmetric Contraction Shape on Incompressible Turbulent Flow", Journal of Fluids Engineering, Vol. 98, No. 1, pp. 58-68.
 7. M. N. Mikhail, 1979, "Optimum Design of Wind Tunnel Contractions", AIAA Journal, Vol. 17, No. 5, pp. 471-477.
 8. SC/Tetra(Version 12), 2015, User's Guide, Software Cradle Co., LTD.
 9. J. K. Kim and S. H. Oh, 2017, "Study on the Turbulent Flow Field Characteristics of Morel Contractions According to the Matching Points", Proceedings of the Korean Society for Power System Engineering Spring Annual Meeting, June 1-2, pp. 144-145.
 10. J. K. Kim and S. H. Oh, 2017, "Study on the Turbulent Flow Field Characteristics of Morel Type Wind Tunnel Contraction by CFD Analysis", Proceedings of the Korean Society for Mechanical Engineering Spring Annual Meeting, May 12, pp. 44-46.