



수축부 길이 변화에 따른 풍동 내부유동장 특성에 대한 수치해석 Numerical Analysis on the Internal Flow Field Characteristics of Wind Tunnel According to the Change of Contraction Length

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

(Received 01 June 2018, Revision received 01 August 2018, Accepted 01 August 2018)

Abstract: The steady-state, incompressible and three-dimensional numerical analysis was carried out to investigate the internal flow field characteristics of wind tunnel according to the change of contraction length. This study used a realizable $k-\epsilon$ turbulence model. As a result, regardless of the contraction lengths, the minimum value of the axial mean velocity component at the entrance of the plenum chamber is increased through the contraction and has the maximum value in the test section. When the flow passes through the inner space of the analytical models, the average pressure and axial force due to the surface pressure acting at the inlet of the plenum chamber is the smallest at the contraction length of 1,000 mm, but the axial force due to the surface stress increases as the contraction length increases. The maximum turbulent kinetic energy in the test section decreases as the contraction length increases. Comprehensively, it can be concluded that the contraction length of 1,000 mm at the contraction area ratio of 9:1 is the best choice for wind tunnel selection with superior performance.

Key Words : Boundary Layer Thickness, Contraction, Numerical Analysis, Subsonic Wind Tunnel

— 기 호 설 명 —

C_μ : 와점성계수(=0.09) [-]	L : 수축부 길이 [m]
D_e : 수축부 출구 높이 [m]	R : 수축부 높이 [m]
D_i : 수축부 입구 높이 [m]	Re : 레이놀즈(Reynolds) 수 [-]
F_{pz} : 수축부 표면의 압력에 의한 힘 [N]	V_i : 수축부 입구 평균속도 [m/s]
F_{sz} : 수축부 표면의 응력에 의한 힘 [N]	T_i : 수축부 입구 난류강도(=10%) [-]
k : 난류운동에너지 [m^2/s^2]	x, y, z : 3차원 직교좌표계의 좌표 [m]
	V_z : 유동축방향의 평균속도성분 [m/s]
	$(V_z)_{max}$: 유동축방향의 최대평균속도성분 [m/s]

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

*오석형 : 군산대학교 기계공학부

*** 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.

- v_z : 유동축방향의 변동속도성분 [m/s]
- Z : 수축부 축방향의 거리 [m]
- Z_{TS} : 시험부의 축방향 거리 [m]
- δ : 경계층 두께 [mm]
- ϵ : 난류소산에너지 [m^2/s^3]

1. 서 론

일반적으로 수축부(contraction) 형상은 속도를 가속시킬 뿐만 아니라 속도분포의 밀도를 증대시키기 때문에 풍동(wind tunnel)의 부속품이나 노즐(nozzle)로서 많이 활용되고 있다. 특히 아음속 풍동의 수축부는 보통 정류실(plenum chamber)내 허니콤(honeycomb)과 시험부(test section) 사이에서 설치되므로, 그 길이에 따라 시험부 내의 유동의 질은 매우 민감한 영향을 받게 된다. 즉 제한된 짧은 길이를 갖는 수축부는 출구에서 유동박리에 의한 역압력기울기를 초래하므로, 시험부에서 경계층두께가 커지거나 축방향 속도분포 및 난류강도의 불균일성이 발생할 수도 있다.^{1,4)} 따라서 풍동 시험부는 보다 균일한 축방향 속도분포와 얇은 경계층두께 및 매우 낮은 난류수준의 성능들을 요구하기 때문에, 이에 적합한 수축부 형상을 결정하는 것은 매우 중요한 설계수단이 될 수 있다. 한편, 대부분의 노즐이나 풍동에서 사용되는 수축부의 형상들은 ASME형^{1,2)}, BE형¹⁾, BS형¹⁻³⁾, Cubic형^{1,2)}, Cosine곡선형³⁾ 및 Morel형⁴⁾ 등으로 잘 알려져 있다.⁵⁻⁷⁾ 이 중에서도 Hussain 등²⁾은 Cubic형이 대체로 가장 작은 역압력기울기와 경계층두께를 형성한다고 밝힌 바 있다. 또한 Kim 등⁵⁻⁷⁾도 Cubic형의 수축부가 유동저항이 가장 작으며, 경계층두께 및 난류운동에너지에서도 우수한 결과들을 보인다고 밝힌 바 있다. 한편, Morel⁴⁾은 수축부 면적비가 4보다 더 커질수록 수축부 길이는 더 짧게 할 수 있으며, 입구직경(높이)에 대한 길이비는 0.75~1.25 사이에 둔다고 하였다. 또 Sano⁸⁾는 수축비와 스크린 수의 증가에 따라 난류강도가 감소함을 알았으며, Downie 등⁹⁾은 수축부의 입·출구 면적비가 5보다 작으면, 유동박리를 피하는 노력이 더 필요하다고 언급하였다.

따라서 이번 연구에서는 Cubic형의 수축부로 입·출구의 면적비를 9:1로 유지시킨 상태에서 길이를 4가지(600 mm, 800 mm, 1,000 mm, 1,200 mm)로 각각 변화시켜 만들어진 유동해석 모델의 성능특성들을 수치해석으로 파악해 어떤 길이에서 유동성능이 가장 우수한지를 살펴보고자 한다. 여기서 수치해석에 사용한 상용소프트웨어는 SC/Tetra(ver.12)¹⁰⁾이었으며, 3차원, 비압축성, 정상 상태에서 사용한 난류모델은 표준 k- ϵ 난류모델을 수정한 Realizable k- ϵ 이었다.

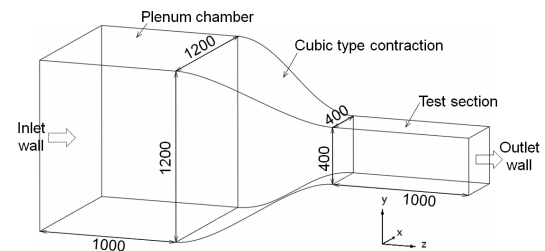


Fig. 1 Geometry configuration for analyzing model with cubic type contraction

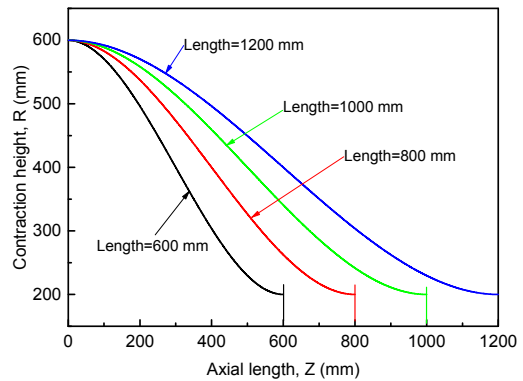


Fig. 2 Curvature profiles of cubic type contraction according to the change of lengths

2. 수치해석

2.1 해석모델⁵⁻⁷⁾

Fig. 1은 입·출구 면적비가 9:1인 Cubic형 수축부를 통과하는 유동장을 해석하기 위해 설정한 유동해석 모델의 기하학적 형상과 크기를 나타낸

그림이다. 여기서 기하학적으로 원점인 정4각단면 형상의 수축부 입구 쪽은 가로, 세로길이가 각각 1,200 mm, 길이가 1,000 mm인 정류실이 붙어 있으며, 수축부 출구 쪽에는 가로, 세로길이가 각각 400 mm, 길이가 1,000 mm인 시험부가 붙어 있다. 한편, 나머지 유동해석모델들도 수축부 입·출구 쪽의 가로, 세로길이들을 동일하게 유지하면서 수축부 길이만 변화되도록 만들었다.

Fig. 2는 3차 곡선식을 갖는 Cubic형 수축부들의 곡률변화들을 나타내며, 모두 식 (1)로 주어진다.⁵⁻⁷⁾(기하학적 변수들은 Fig. 3 참조)

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

Fig. 4는 Fig. 1의 계산영역을 격자 형상으로 나타낸 그림이다. 여기서 모든 풍동 수축부 형상들

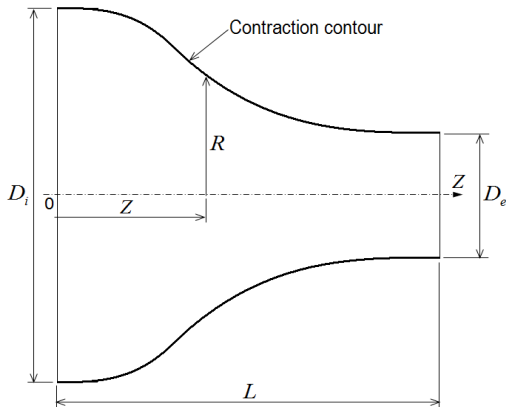


Fig. 3 Definition of cubic type contraction curve

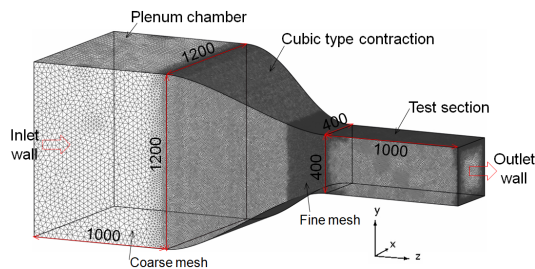


Fig. 4 Mesh configuration for numerical analysis model with cubic type contraction

은 상용 소프트웨어인 CATIA(V5R18)로 모델링하였으며, 수축부 입·출구에 각각 붙인 정류실과 시험부는 SC/Tetra의 전처리 기능으로 만들었다. 특히 격자생성은 해석결과에 적합한 격자크기를 자동으로 맞춰주는 격자적용해석(mesh adaptation analysis) 기능을 이용하였다. 이때, 격자의 총 요소(element)수는 1,000만 개로 설정하였으며, 무차원 벽두께(y^+)는 $y^+ = 50$, 벽두께 변화율은 1.1, 프리즘층(prism layer)은 2개인 SC/Tetra의 기본조건들을 반영하였다.¹⁰⁾

2.2 수치기법⁵⁻⁷⁾

Fig. 4에서 적용한 해석모델의 모든 벽면에는 점착(no-slip)의 경계조건들을 설정하였으며, 정류실의 입구표면에서는 시험부의 평균속도가 레이놀즈수로 $Re=9.265 \times 10^5$ 이 되도록 질량유량 6.7536 kg/s를 사용하였다. 이때, 초기 난류운동에너지와 난류소산에너지는 난류강도 10%를 갖는 완전히 발달된 유동조건들로 고려하여 식 (2)로 계산한 $k = 0.22685 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $\epsilon = 0.21136 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 을 각각 적용하였다. 또 시험부의 출구표면은 대기압조건을 적용하였다.

$$k = 1.5 (V_i \cdot T_i)^2, \quad \epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} \cdot k^{3/2}}{0.07 D_i} \quad (2)$$

한편, 해(solution)의 원활한 제어를 위해 운동량 및 난류모델방정식들의 대류(convection)항들은 모두 2차 풍상차분법(upwind scheme)으로 이산화하였으며, 확산(diffusion)항들은 초기조건인 정밀도가중기법을 사용하였다.¹⁰⁾ 또한 압력보정방법은 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였으며, 압력항 및 모든 변수들의 완화계수는 초기상태인 값들을 반영하였다. 그리고 해의 수렴조건은 모든 변수들의 잔류값이 1.0×10^{-6} 일 때로 설정하였다.¹⁰⁾

3. 해석결과 및 고찰

3.1 축방향 평균속도성분의 분포

Fig. 5는 $X=Y=0$ mm인 4가지 수축부들을 갖는

유동해석모델들 중심부에서 유동 축방향 거리증가에 따라 얻어진 축방향 평균속도성분의 분포들을 나타낸 그림이다. 축방향 거리증가에 따라 축방향 평균속도성분의 크기는 정류실 입구에서 최소값을 갖다가 수축부를 거치면서 가속되고 시험부에서 최대값을 갖는 공통성이 모든 수축부들에서 나타난다. 그러나 이 같은 현상은 수축부의 길이에 따라 다른 특성들을 보이고 있다. 즉, 수축부의 길이가 짧아지면, 축방향 평균속도성분은 수축부 입구 전부터 가속현상이 더 발생하며, 수축부 출구를 벗어나서도 여전히 가속되는 구간이 더 크게 형성됨을 알 수 있다. 따라서 이런 현상을 완화하기 위해서는 수축부의 입·출구 면적비에 따른 적절한 길이를 확보해야할 필요가 있다고 본다.

Fig. 6은 질량유량 6.7536 kg/s가 모든 유동해석 모델들의 내부공간을 통과할 때, 정류실 입구부에서 작용하는 평균압력을 수축부 길이에 따라 나타낸 그림이며, 동시에 Fig. 7, Fig. 8은 수축부 표면에 작용하는 축방향 압력성분에 의한 힘과 축방향 응력성분에 의한 힘을 각각 나타낸 그림들이다. 평균압력과 축방향 표면압력 성분에 의한 힘들은 각각 수축부 길이가 1,000 mm에서 가장 작은 크기를 보이므로, 성능이 가장 우수함을 알 수 있다. 여기서 수축부 길이 1,000 mm는 수축부 입구직경(높이)에 대한 길이비로 계산할 때, 약 0.83에 해당하므로 Morel⁴⁾이 제안한 길이비의 기준(0.75 ~ 1.25)에 속함을 이번 수치해석 결과로부터

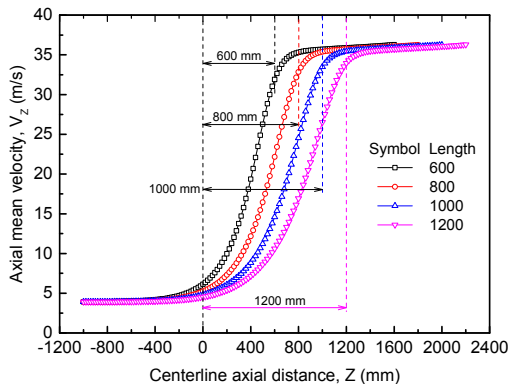


Fig. 5 Axial mean velocity profiles along the centerline of contraction

알 수 있다. 특히, 이것은 풍동송풍기의 동력증가에 큰 영향을 미치게 되므로, 중요한 설계기준이 될 수 있다. 한편 Fig. 8의 축방향 표면응력성분에 의한 힘은 압력에 의한 힘보다는 훨씬 작은 크기이지만, 수축부 길이증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 이것은 수축부 길이가 증가하면, 그만큼 벽 표면적이 더 늘어나 마찰저항이 더 증가하므로 나타나는 현상으로 판단된다.

Fig. 9는 4가지 수축부 길이들을 갖는 유동모델 별로 시험부 내 축방향 하류측의 위치(Z_{TS})들에 따라 벽면으로부터 형성된 축방향 평균속도성분들의 분포를 나타낸 그림이다. 여기서 시험부는 가로, 세로가 각각 400 mm인 정사각형의 대칭 형

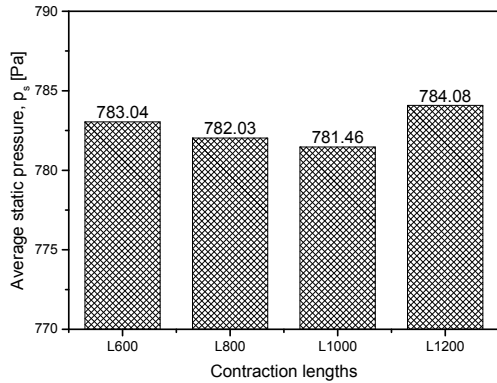


Fig. 6 Average pressure profiles acting at the inlet wall

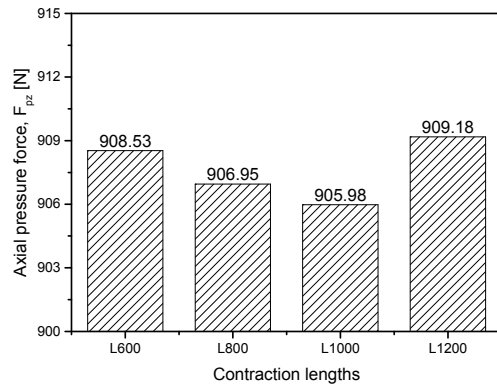


Fig. 7 Axial pressure force profiles acting at the contraction surface

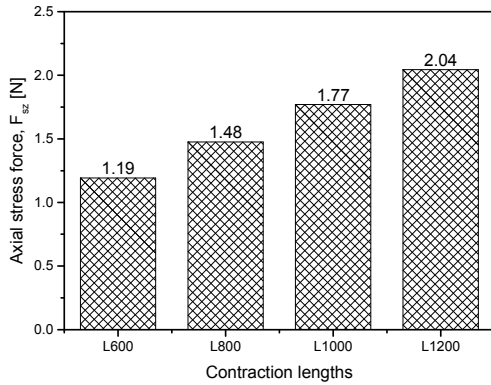


Fig. 8 Axial stress force profiles acting at the contraction surface

상이므로, Fig. 9에서는 수평 중심부($X=0$)를 기준으로 Y방향의 높이 200 mm(상단부)에서 아랫방향으로 135 mm까지의 축방향 평균속도성분들을 나타내었다. 평균속도의 기울기가 일정하지 않은 경계층두께에 해당하는 높이(Y) 구간은 축방향 거리가 증가함에 따라 점차 증가하여 나타나 있다.(Fig. 10 참조) 또 수축부 출구에 해당하는 각 유동해석모델별 $Z_{TS}=0$ mm에서는 수축부 길이에 따라 중첩되지 않고 속도분포의 편차가 크게 나타나는데, 이것은 수축부 길이에 따라 발달하는 속도분포에 차이가 발생해 나타나는 현상으로 본다. 특히 벽면에 매우 근접한 영역의 경계층 내에서는 수축부 길이에 관계없이 모두 급격한 기울기를 갖는 축방향 평균속도성분들이 분포되며, 이 속도기울기를 유지하는 최대 평균속도크기들과 일정한 수평기울기를 보이는 축방향 평균속도성분들의 크기 차이는 수축부 길이가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 또 $200\text{ mm} < Z_{TS} < 800\text{ mm}$ 의 영역에서는 축방향 평균속도성분들이 수축부 길이에 관계없이 중첩되어 고른 성능을 보이나, $Z_{TS}=1,000\text{ mm}$ 의 경계층 내 벽면 근처에서는 속도 기울기가 달라 완전히 중첩되지 않는 속도분포들이 나타나는데, 이것은 $Z_{TS}=1,000\text{ mm}$ 가 대기압 경계조건인 시험부 출구면에 해당되어 유동모델들 특성에 따라 벽면의 영향이 배제되어 발달한 속도기울기 차이의 변화로 판단된다.⁵⁾

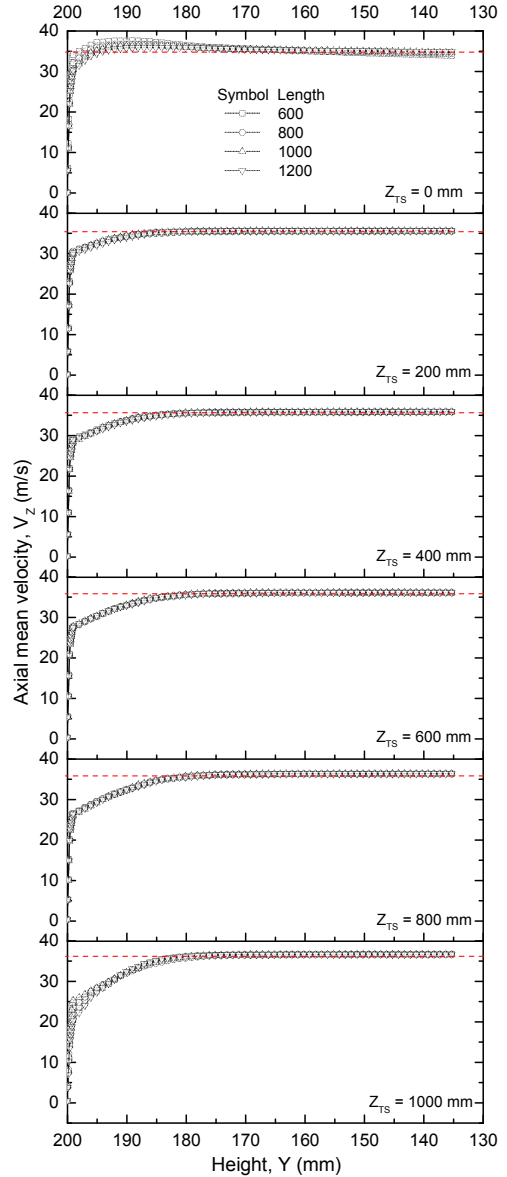


Fig. 9 Axial mean velocity profiles along the height of test section

3.2 경계층두께

Fig. 10은 Fig. 9로부터 얻어진 경계층두께를 나타낸 그림이다. 여기서 경계층두께는 시험부 내에서 일정속도에 도달하기 직전의 높이로 결정하였다. Fig. 9에서 경계층두께는 시험부 입구 근처에서 $Z_{TS}=400\text{ mm}$ 이전까지는 다소 들쭉날쭉한 분

포를 보이거나, $Z_{TS}=400$ mm 이후에서는 비교적 고
 른 분포를 보이며, 전체적으로 축방향 거리증가에
 따라 완만하게 증가하여 시험부 내에서 최대 30
 mm 이내의 크기를 보이고 있다. 한편, 경계층두
 겹께는 수축부 길이에 관계없이 식 (3)으로 나타낼
 수 있다. 여기서 식 (3)을 만족하는 계수들은
 Table 1에 나타내었다.

$$\delta = a + \frac{b}{Z_{TS}} + \frac{c}{Z_{TS}^2} + \frac{d}{Z_{TS}^3} + \frac{e}{Z_{TS}^4} \quad (3)$$

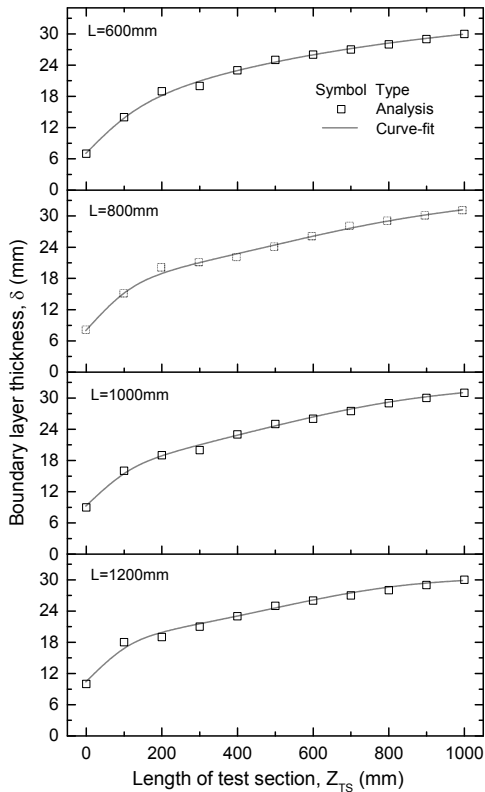


Fig. 10 Boundary layer thickness profiles along the length of test section

Table 1 Coefficients of curve-fits(in Eq. 4)

L(mm)	a	b	c	d	e
600	1.2720747E+00	2.5051300E+05	-6.7189386E+08	7.1395383E+11	-2.8686127E+14
800	-1.3625059E+02	1.1215750E+06	-2.6555803E+09	2.6487270E+12	-9.7062234E+14
1000	-1.6102566E+02	1.2255533E+06	-2.7902423E+09	2.6918758E+12	-9.5711217E+14
1200	-2.4462222E+02	1.6911430E+06	-3.7703278E+09	3.6064658E+12	-1.2724958E+14

3.3 난류운동에너지의 분포

Fig. 11은 4가지 수축부 길이를 갖는 유동해석
 모델들의 $X=Y=0$ mm인 중심부에서 축방향 거리증
 가에 따라 얻어진 난류운동에너지의 분포들을 나
 타낸 그림이다. 유동해석모델들의 난류운동에너
 지의 크기는 매우 작지만 정류실 입구로부터 축방
 향 거리증가에 따라 서서히 감소하다가 수축부의
 길이가 짧아지면, 수축부 입구 이전부터 발달하여
 수축부를 거치면서 급속히 증가한 다음, 시험부
 에서 쇠뿔값에 도달하다가 시험부 출구를 향할수록
 감소해 나타난다. 이때, 시험부내에서 난류운동
 에너지의 크기는 수축부 길이가 길수록 작게 나타
 나며, 가장 긴 1,200 mm에서 가장 작게 나타난다.

한편, 시험부 내에서 난류운동에너지의 크기는
 균질성(homogeneous) 유동에 대해서는 $k=3v_z^2/2$ 을
 만족하므로, 시험부내의 최대난류강도는 식 (4)로
 계산할 수 있으며, 그 결과들을 Table 2에 나타내
 었다. 따라서 시험부 내에서 최대난류강도는 수축
 부 길이 1,200 mm에서 약 2.41%로 가장 작게 나
 타나 가장 우수함을 보여준다.

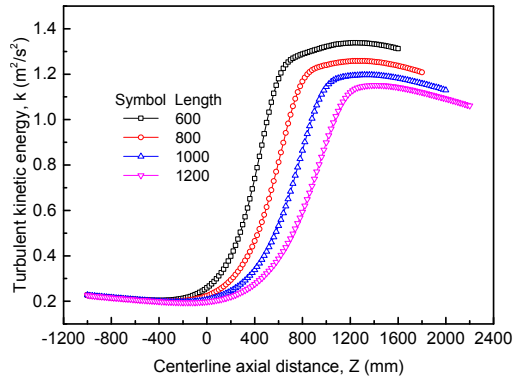


Fig. 11 Turbulent kinetic energy profiles along the centerline of contraction

Table 2 Turbulent intensity obtained in test section

L(mm)	k	$(V_z)_{max}$	$\sqrt{v_z^2}/(V_z)_{max}$ (%)
600	1.338855	36.27585	2.6044
800	1.258678	36.25083	2.5269
1,000	1.196765	36.23973	2.4648
1,200	1.151267	36.28966	2.4141

$$\frac{\sqrt{v_z^2}}{(V_z)_{\max}} = \frac{1}{(V_z)_{\max}} \sqrt{\frac{2}{3} k} \quad (4)$$

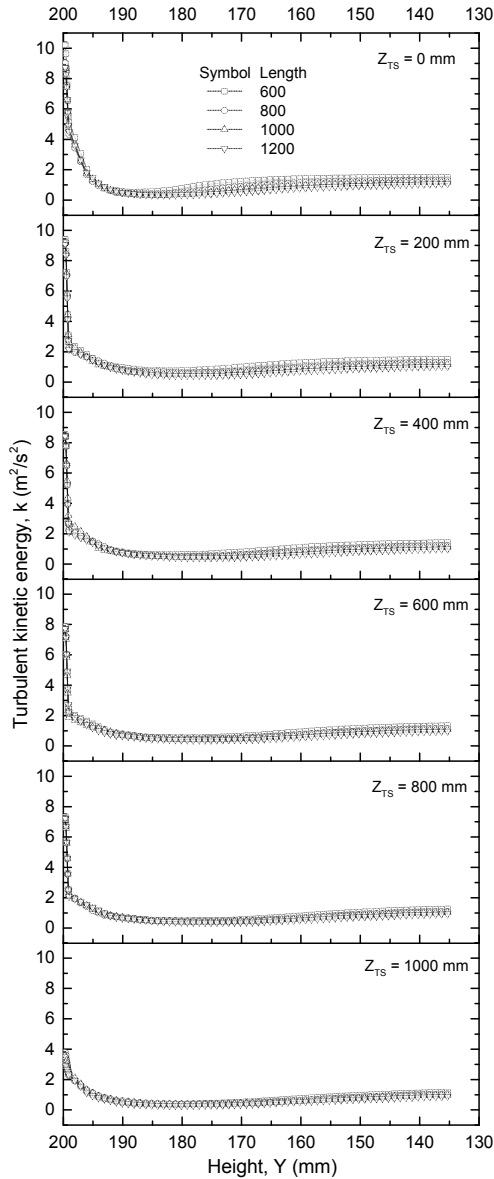


Fig. 12 Turbulent kinetic energy profiles along the height of test section

Fig. 12는 4가지 수축부 길이들을 갖는 유동해석모델별로 시험부 축방향 하류측 위치(Z_{TS})들에 따라 벽면으로부터 중심부를 향해 형성된 난류운동에너지의 분포들을 나타낸 그림이다. 여기서 시험부는 가로, 세로 길이가 각각 400 mm인 정사각형의 대칭 형상이므로, 난류운동에너지들은 수평방향 중심부($X=0$)를 기준으로 수직방향(Y 방향)의 상단부 높이 200 mm에서 아랫방향으로 135 mm까지 나타내었다. 수축부 길이들에 관계없이 시험부 벽면에서 형성된 난류운동에너지들은 최댓값을 보이며, 축방향 거리 증가에 따라 그 크기는 점차 줄어들음을 알 수 있다. 또한 시험부 벽면으로부터 높이가 감소하여 중심부 쪽으로 향함에 따라 난류운동에너지의 크기들은 급속히 감소하다가 미소한 크기의 상승을 보인 다음, 벽면으로부터 약 50 mm 이후부터는 일정한 크기로 수렴된다. 이때 난류운동에너지의 분포는 수축부 길이가 길수록 작은 크기를 보이고 있다. 다만 수축부 출구이자 시험부 입구인 $Z_{TS}=0$ mm에서는 유동해석모델들에 따라 난류운동에너지의 분포가 작은 크기지만 다소 편차를 나타내는데, 이것은 이곳에서 유동해석모델들로 축방향 평균속도성분들이 다소 편차를 나타냄에 따라 그 속도기울기들이 다르게 분포되어 발생한 원인들로 판단된다. 그러나 시험부 내 축방향 길이가 증가할수록 유동해석모델들에 관계없이 난류운동에너지의 분포가 이루는 크기 편차는 감소함을 알 수 있다.

4. 결 론

4가지 종류의 수축부 길이들을 갖는 유동해석모델들의 내부유동장을 3차원, 비압축성, 정상상태에서 Realizable $k-\epsilon$ 의 난류모델로 수치 해석한 결과는 다음과 같다.

1) 수축부 길이에 관계없이 정류실 입구에서 최솟값을 갖는 축방향 평균속도성분의 크기는 수축부를 거치면서 가속되어 시험부에서 최댓값을 갖는다.

2) 유동모델 중심축 상을 따라 형성된 축방향 평균속도성분의 분포는 수축부의 길이가 짧아지면, 수축부 입구 전부터 가속현상이 더 발생하며, 수축부 출구를 벗어나서도 여전히 가속되는 구간이 더 크게 형성된다.

3) 유동이 해석모델의 내부공간을 통과할 때, 정류실 입구에서 작용하는 평균압력과 수축부 표면에 작용하는 축방향 압력성분에 의한 힘의 크기는 수축부 길이 1,000 mm에서 가장 작으나, 축방향 응력성분에 의한 힘의 크기는 수축부 길이가 증가할수록 커진다.

4) 시험부 내에서 형성되는 경계층두께의 분포는 수축부 길이 변화에 관계없이 축방향 거리증가에 따라 하나의 근사식으로 얻어진다.

5) 시험부 내의 최대 난류운동에너지는 수축부 길이가 증가할수록 작아진다.

6) 종합적으로 고려할 때, Cubic형의 수축부 면적비 9:1에서는 수축부의 길이 1,000 mm가 성능이 우수한 풍동 선택에 있어 가장 좋다고 판단된다.

References

1. J. K. Kim, 1987, "An Experimental Study on the Statistical Turbulent Characteristics of Two Round 45° Cross Jet with a Constant Exit Velocity", Ph.D. Thesis, Jeonbuk National Univ.
2. 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.
3. M. 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. T. Morel, 1975, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions", Journal of Fluid Engineering, Vol. 97, pp. 225-233.
5. J. K. Kim and S. H. Oh, 2017, "Numerical Analysis on the Internal Flow Field Characteristics of Wind Tunnel According to Contraction Type", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 6, pp. 5-12. (DOI:10.9726/kspse.2017.21.6.005)
6. J. K. Kim and S. H. Oh, 2017, "Investigation of Turbulent Flow Field Characteristics According to Contraction Shape", Proceedings of the Korean Society for Power System Engineering Spring Annual Meeting, June 1-2, pp. 146-147.
7. J. K. Kim and S. H. Oh, 2017, "Study on the Characteristics of Flow Field According to the Contraction Type of Wind Tunnel by CFD Analysis", Proceedings of the Korean Society for Mechanical Engineering Spring Annual Meeting, May 12, pp. 47-49.
8. M. 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.
9. J. H. Downie, R. Jordinson and F. H. Barnes, 1984, "On the Design of Three-Dimensional Wind Tunnel Contractions", Aeronautical Journal, Vol. 88, No. 877, pp. 287-295.
10. SC/Tetra(Version 12), 2015, User's Guide, Software Cradle Co., LTD.