

<論文>

전산유동 해석을 이용한 수동의 유동 균질성 평가

임영택*·김문상†·장조원‡

Estimation of Flow Uniformity in Water Tunnel by Using CFD Analysis

Y. T. Lim*·M. S. Kim†·J. W. Chang‡

목 차

- I. 서 론
- II. 수동의 형상 및 특징
 - 3.1 지배방정식
 - 3.2 유한체적법
 - 3.3 SIMPLE 알고리즘
 - 3.4 집중변수모델
- III. 지배방정식 및 수치해석 기법
 - 4.1 저항계수의 결정
 - 4.2 수동에 대한 유동해석
- IV. 수치해석 결과
- V. 결 론

ABSTRACT

It is easier to view flow visualization by using a water tunnel rather than a smoke wind tunnel because of low speed at same Reynolds number. Using a water tunnel also produces more definite flow visualization by the use of various color dyes. The flow uniformity in test section is very significant for accuracy of the test because most flow experiments elicit results through the installation of a model in uniform flow. The purpose of small-size desktop-type water tunnel is not to produce quantitative measurements, but rather to give a visualization of the fluid flow phenomenon. However, uniformity in the test section affects the accuracy of the results. Accordingly, this research estimates uniformity in a water tunnel test section by using the commercially available CFD code FLUENT. Results of the CFD analysis show that the flow uniformity of the test section is good.

Keywords: Water tunnel (수동), FLUENT(CFD 상용 코드), SIMPLE scheme (SIMPLE 기법), Flow uniformity (유동 균질성)

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

† 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

연락처자, E-mail : mskin@hau.ac.kr

‡ 한국항공대학교 항공운항학과

I. 서 론

일반적으로 흐름 가시화작업은 유동 문제를 관찰하고 이를 분석하기 위하여 수행하게 된다. 이때 사용하는 흐름가시화 장치는 오일을 태워 연기를 발생시키는 연풍동(smoke wind tunnel)이 주로 사용된다[1]. 그러나 연풍동과 같은 흐름가시화 장치는 건강에 해로운 연기를 발생 시킬 뿐만 아니라, 연기가 발생하는 시간이 짧아 가시화 실험 시 충분한 결과를 얻기 어렵다.

연풍동 이외에 다른 흐름가시화 장치에는 수동(water tunnel)이 있으며, 이러한 수동은 동일한 레이놀즈수에서 연풍동에 비하여 유속이 느리기 때문에 흐름가시화에 좀 더 용이하다. 또한 여러 가지 색의 염료를 사용할 수 있기 때문에 좀 더 확실한 유체의 흐름을 관찰할 수 있다. 그러나 기존의 수동(water tunnel)을 이용한 흐름가시화 장치는 비교적 장치규모가 커서 비효율적이고, 일부 장치는 누수현상이 발생하는 단점이 있다.

이런 단점을 보완하여 대학에서 제반 유체역학 현상에 관한 실험교육을 수행하기 위해서는 저난류도 및 고균질성의 흐름특성을 갖고 있는 흐름가시화 장치가 필요하다. 또한 이러한 특성에 맞는 장치는 미국 EDDETICS社가 개발한 수동(water tunnel)을 수입하여 사용하는 방법이 있으나[2], 수입대체를 위하여 수동을 이용한 흐름가시화 장치의 개발이 필요하다.

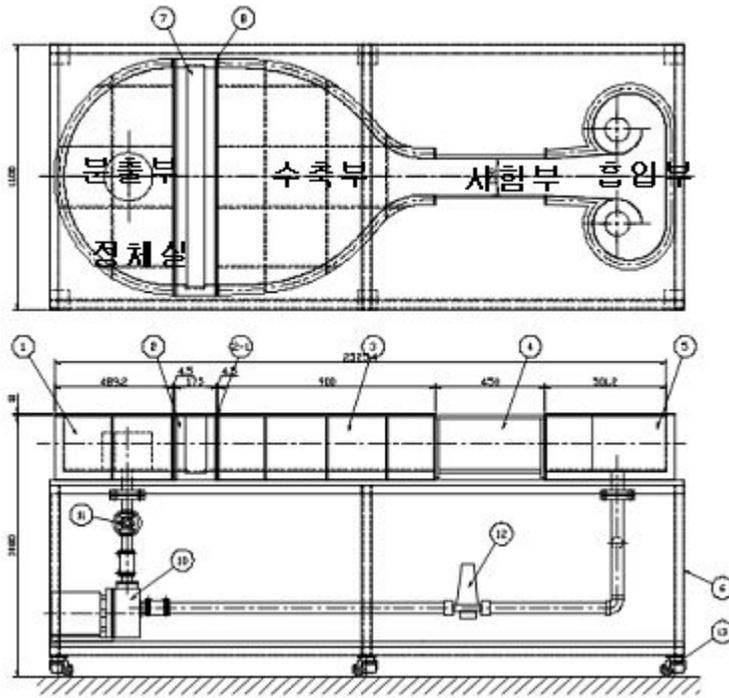
데스크탑 형태의 소형 수동(water tunnel)은 유체역학적 흐름현상의 가시화에 그 목적을 두고 있지만, 본 연구에서는 시험부의 유동 균질성은 실험 결과의 정확성에 영향을 미치므로 전산유동해석 상용코드인 플런트(FLUENT)를 이용하여 시험부의 유동 균질성을 평가하였다.

II. 수동의 형상 및 특징

<그림 1>은 본 연구에 사용된 수동의 형상과 각부 명칭을 나타낸 것이다. 수동은 분출부, 정체실, 수축부, 시험부, 흡입부 등으로 구성되어 있는데, 분출부는 여러 구멍을 통해 유체가 분출될 수 있도록 다공판이 설치된 실린더 형태로 제작되었다. 분출부로부터 유입된 유체는 정체실을 거쳐 스크린과 허니콤을 지나면서 난류강도가 줄어들고 유동 균질성이 높아진다. 수축부에서는 유동을 가속시켜 시험부에서 필요한 유속을 얻게 된다[3].

시험부는 흐름현상을 관찰할 수 있도록 아크릴로 제작되어 있으며, 15cm(W)×22.5cm(H) ×45cm(L)의 치수로 좁은 공간에도 설치가 용이하도록 크기를 최소화하였고, 유체의 마찰을 최소화하기 위한 형태로 제작되어 있다.

분출부에서 유입되는 유량은 200 L/min으로 수면의 높이를 약 15cm정도로 유지하므로 시험부에서 설계 유속은 약 14.8cm/sec이다.



1	Water Inlet Duct
2	Settling Chamber
2-1	Screen Support
3	Contraction Duct
4	Test Section
5	Drain Duct
6	Base
7	Honey Comb
8	Screen
9	Cover
10	Pump
11	Flow Control Valve
12	Filter
13	Wheel

<그림 1> 흐름가시화 장치의 전체 도면

III. 지배방정식 및 수치해법

3-1. 지배방정식

난류를 동반하는 유동장의 특성을 지배하는 방정식을 텐서(tensor) 형식으로 표현하면 다음과 같다.

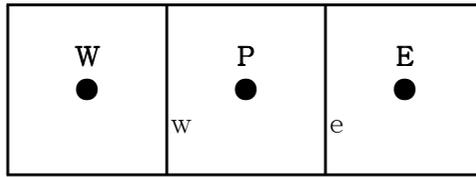
$$\textcircled{1} \text{ 질량보존 : } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = S_m$$

$$\textcircled{2} \text{ 운동량 보존 : } \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i + F_i$$

$$\textcircled{3} \text{ 스칼라 보존 : } \frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi$$

3-2. 유한체적법

계산 영역은 여러 개의 작은 영역으로 분할되는데 이 분할된 모양을 격자라고 하고, 각각의 작은 영역을 셀(cell)이라고 한다. 3차원일 경우 셀들은 보통 육면체이거나 사면체의 형상을 가지며, 모든 물리량들은 이 셀들의 중심에 저장된다. 이렇게 각 셀의 체적에 보존 법칙을 적용하기 때문에 이 방법을 유한체적법이라고 한다. 2차원 또는 3차원 공간상에서의 유체의 거동의 해석을 목적으로 하는 지배방정식을 유한체적법에 의하여 이산화하는 과정을 1차원적으로 나타내면 다음과 같다.



<그림 2> 1차원 셀

<그림 2>에 나타난 바와 같이 각 셀의 중심은 **W**, **P**, **E**이며 셀 사이의 face는 **w**와 **e** 이다. 1차원, 정상상태(steady state)일 경우 스칼라 ϕ 의 보존식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + S_\phi \quad (1)$$

이 식을 셀 P에 적용하여 적분하고, 발산 정리(divergence theorem)를 적용한다. 왼쪽의 대류항(convection term)의 경우는 식(2)와 같이 전개되고,

$$\begin{aligned} \int_{\text{Volume } V} \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} dV &= \int_{\text{surface } A} \rho u \phi dA \\ &= (\rho u \phi A)_e - (\rho u \phi A)_w \end{aligned} \quad (2)$$

오른쪽의 확산항(diffusion term)과 원천항(source term)은 식(3)과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \int_{\text{volume } V} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + S_\phi \right] dV &= \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w + S_\phi \Delta V \end{aligned} \quad (3)$$

모든 변수는 셀 중심인 P, W, 그리고 E에 저장되어 있기 때문에 ϕ 와 $\frac{\partial \phi}{\partial x}$ 의 e와 w에서의 값은 중심 값으로부터 계산해야만 한다. 이 값들을 계산하는 방법으로 ① first order upwind scheme, ② power-law scheme, ③ second order upwind scheme 등이 있으며 본 연구에서는 first order upwind scheme을 사용하였다.

이렇게 만들어진 적분식을 각 셀에 대해 계산하고서 조합하면 다음과 같은 행렬식이 나온다.

$$a_P \phi_P = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (4)$$

여기서 nb는 셀 P의 이웃 셀들을 나타낸다. 이차원 사각형 격자의 경우 P의 이웃 셀은 모두 4개이며 3차원 육면체의 경우는 6개가 된다. 비선형식의 경우 a_P 와 a_{nb} 가 ϕ 의 함수이므로 반복계산법을 이용하여 해를 얻을 수 있다.

3-3. SIMPLE 알고리즘

보통의 비압축성 유동에서는 압력을 얻기 위한 방정식이 존재하지 않는다. 플런트 (FLUENT)에서 사용하는 SIMPLE 알고리즘에서는 연속방정식과 운동량 방정식을 조작하여 얻어진 압력 보정식을 이용하여 계산하게 되는데 계산 과정은 다음과 같다[4].

- ① 운동량 방정식을 풀어서 u, v, w 값을 얻는다.
- ② 압력 보정식을 풀어서 새로운 압력값을 얻는다.
- ③ 난류 방정식을 푼다.
- ④ 그 외 스칼라 방정식을 푼다.
- ⑤ 수렴성을 조사하여 ①번부터 반복계산을 수행한다.

3-4. 집중변수모델

본 연구에서는 허니컴과 스크린, 다공판에 대하여 집중변수모델(Lumped Parameter Model)을 적용하였다. 이러한 집중변수모델은 다공성 재질 또는 관군과 같은 무수히 많은 유로로 구성된 형상을 전산유동해석에서 구현하고자 할 때 적용하면 간단하면서도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있는 모델이다. 집중변수모델의 입력 값으로는 저항계수를 넣어주게 되는데 저항계수는 관성 손실항과 점성 손실항으로 나뉜다. 압력강하는 유속에 관한 관계식으로 아래 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\Delta P = a \cdot v^2 + b \cdot v \quad (5)$$

$$a = \frac{1}{2} \rho c_2 \Delta m \quad , \quad b = \frac{\mu \Delta m}{\alpha}$$

c_2 : 운동량 손실항 α : 점성 손실항

계수 a와 b는 유속을 바꿔가며 압력강하를 측정한 후 위의 압력강하와 속도의 관계식에 대입하고 곡선접합을 하여 구할 수 있으며, 저항계수는 이 계수들을 이용하여 얻을 수 있다.

또한, 저항계수를 얻기 위한 압력강하를 구하기 어려운 경우에는 저항계수는 아래의 경험식을 이용하여 얻어진다[5],[6].

$$c_2 = \frac{1}{c} \frac{(A_p/A_f)^2 - 1}{t} \quad (6)$$

$$\alpha = t^2 \times B \quad (7)$$

A_p : 전체 면적

A_f : 유동이 통과할 수 있는 면적

t : 두께

c : 경험상수 (약 0.98)

IV. 수치해석 결과

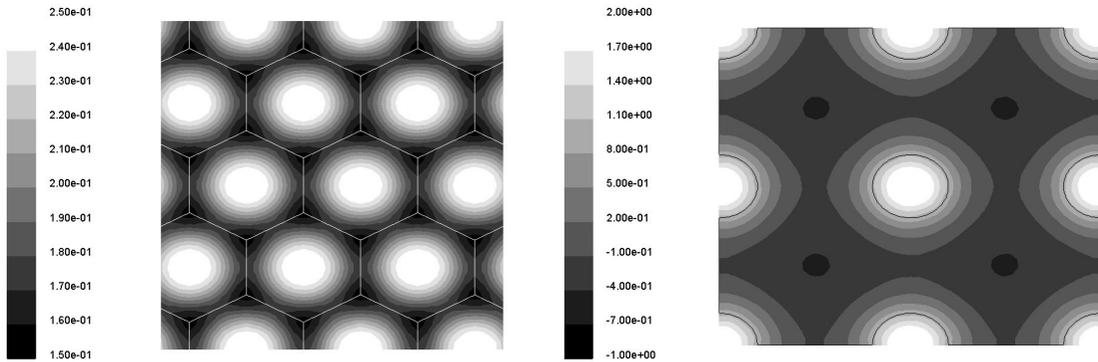
4-1. 저항계수의 결정

본 연구에서는 수동에 설치된 허니컴과 입출구 차단판, 스크린을 집중변수모델(Lumped Parameter Model)로 설정하여 계산하였다. 이 모델을 사용하기 위해서는 적절한 저항계수의 값을 산출하여 입력 조건으로 사용하여야 하는데, 실험의 결과를 이용하면 보다 정확한 수치적 모사를 할 수 있다. 그러나, 본 연구에서는<그림 3>의 허니컴과 분출부의 실제 형상에 대한 전산유동해석으로 얻은 결과를 이용하여 저항계수를 결정하였다. 반면 스크린에 대한 저항계수는 형상의 모델링에 곤란한 점이 있어 경험식을 적용하여 결정된다.



<그림 3> 허니컴과 분출부 다공판의 형상

<그림 4>의 (a)는 허니컴 후방의 속도 분포를 나타낸 것이고, (b)는 분출부 다공판 주변의 유속 분포를 나타낸 것이다. 실제 형상에 대한 계산과 집중변수모델(Lumped Parameter Model)에 대한 계산의 결과를 정량적으로 비교해 보면, 압력강하 값은 <표 1>과 <표 2>에 나타낸 바와 같이 상당히 잘 일치한다.



(a) 허니컴 후방

(b) 분출부 다공판 후방

<그림 4> 허니컴과 분출부 다공판 후방의 속도 분포(m/sec)

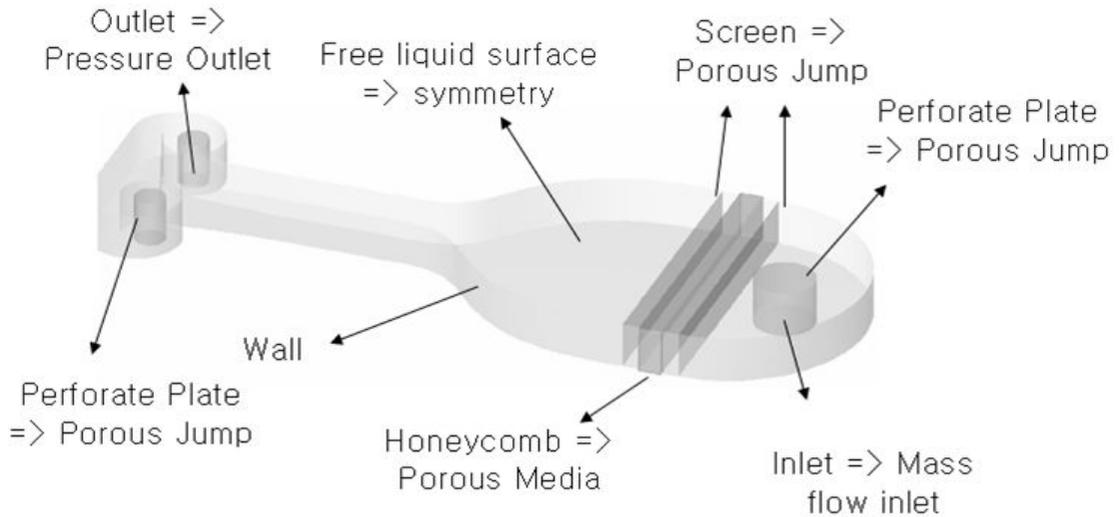
<표 1> 실제 형상에 대한 해석 결과

입구 유속 (m/s)	ΔP (Pa)	
	허니컴	분출부
0.1	29.81	793.84
0.2	70.40	3184.80
0.3	114.78	7159.65

<표 2> 집중변수모델에 대한 해석 결과

입구 유속 (m/s)	Porous Media		Porous Jump	
	ΔP (Pa)	Error (%)	ΔP (Pa)	Error (%)
0.1	30.91	3.69	795.93	0.26
0.2	69.3	1.56	3182.71	0.07
0.3	115.15	0.32	7160.33	0.01

4-2. 수동에 대한 유동해석

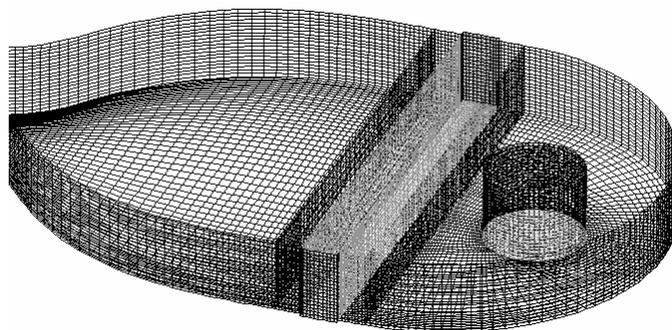


<그림 5> 유동 해석을 위한 경계조건

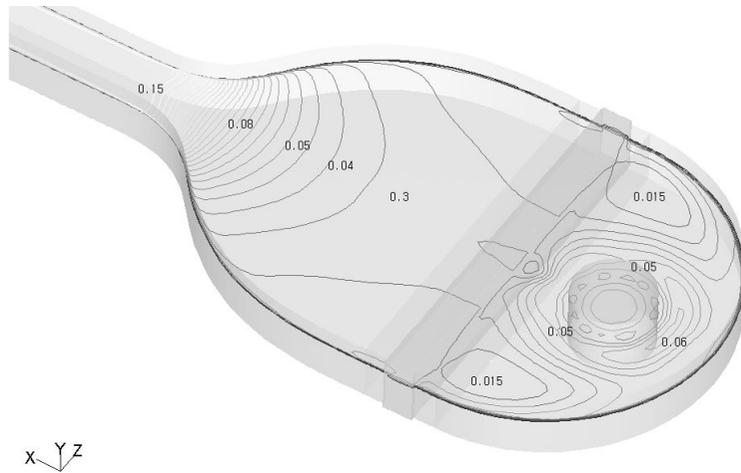
본 연구에 사용된 수동은 개방형으로 실제적으로는 자유수면 모델을 적용하여 계산을 수행하여야 하지만, 시험부에 모델을 설치하지 않고 정상 상태의 흐름을 유지할 때에는 자유수면의 변화가 크지 않다고 판단되어 문제를 단순화시켜 연구를 수행하였다.

수동 해석을 위한 경계조건은 <그림 5>와 같이 수동의 분출부와 허니컴, 스크린은 앞의 과정을 통해 얻은 저항계수값을 이용하여 Porous Media, Porous Jump 조건으로 설정되었고, 자유수면은 대칭 경계조건으로 설정되었다.

수치계산을 위한 격자계는 <그림 6>과 나타낸 바와 같이 약 35만 개의 육면체 격자로 구성되었다.



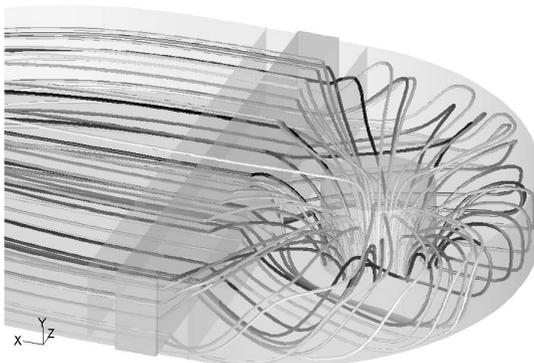
<그림 6> 유동 해석을 위한 격자계



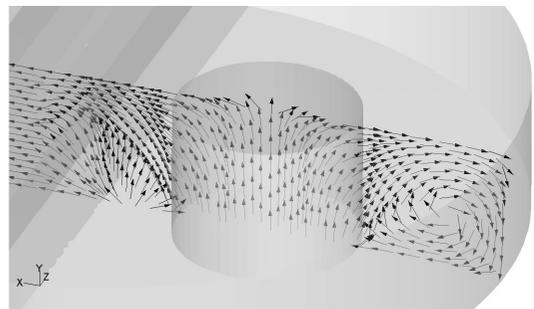
<그림 7> 평면상의 속도 분포 (m/s)

본 연구에 사용된 수동은 정체실과 유동 균일화 장치인 허니컴과 스크린을 지나서 수축부에서 가속되며 수직방향의 형상 변화가 없기 때문에 허니컴 후방의 유속은 <그림 7>에 나타난 바와 같이 상당히 균일하다. 그러나, 분출부에서는 바닥에서부터 유체가 유입되기 때문에 수직 방향으로 유속의 불균일성이 존재하여 정체실 부분에서 유속의 변화가 큰 것을 볼 수 있다. 전체적인 유속이 상당히 느리고 허니컴과 스크린 이외에는 큰 저항체가 없으므로 압력분포는 매우 균일하게 나타나며, 유체의 유입부와 배출구의 차압은 약 363Pa 이다.

정체실 주변의 유동 형태는 <그림 8>에 잘 나타나 있는데, (a)를 보면 분출부에서 유입된 유체가 정체실 벽면에 부딪히며 복잡한 형태의 유동 형태를 보이고 있다. 또한 분출부 바로 주변에서의 유동은 재순환 영역이 형성되는데 (b)의 속도벡터에 나타난 바와 같이 바닥면에서 재순환 영역에 의해 유체가 소용돌이를 일으키고 있음을 알 수 있다.



(a) Pathline

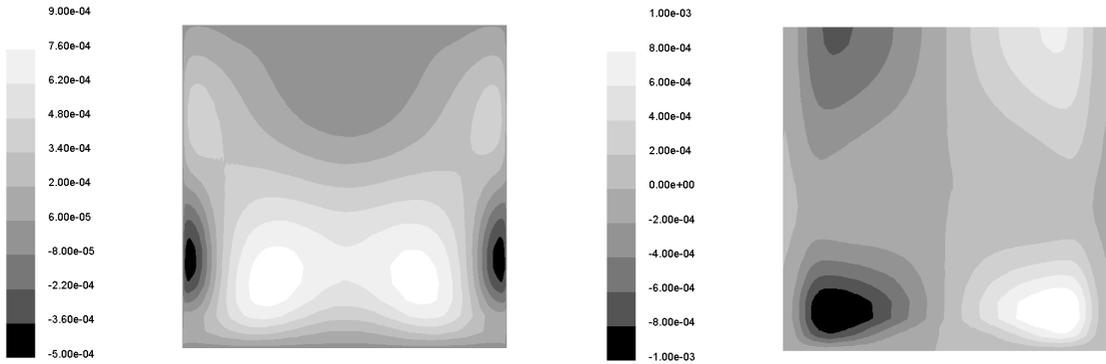


(b) 속도 벡터 (중앙 단면)

<그림 8> 분출부 주변의 유동 특성

본 연구에 사용된 수동은 시험부에 모델을 장착하고 염료 분사장치를 이용해 모델 주변의 유동을 가시화하는 시험장치이다. 따라서 본 연구는 시험부 유입 흐름에 의한 염료의 확산을 최소화하고 유질을 향상시키기 위하여 균질한 흐름이 요구되므로 시험부의 유동 균질성을 조사하였다.

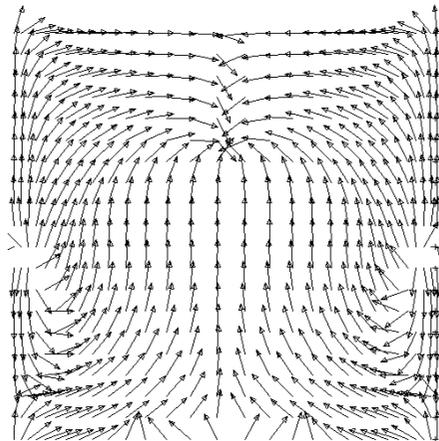
이미 앞에서 언급 했듯이 시험부의 정성적인 유동 형태는 상당히 균일한 것으로 파악하였는데, 주 유동 방향의 속도 분포는 유속의 편차가 매우 작다. 하지만 y, z 방향 속도는 <그림 9>와 같이 불균일하다. y, z 방향 속도 성분이 균일하지 않은 이유는 벽면에 의한 점성 효과 때문에 약한 소용돌이 흐름이 생기고 있기 때문으로 보인다. <그림 10> 속도벡터를 보면 소용돌이의 패턴이 존재하는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 y, z 방향 속도 성분은 주 유동방향의 속도 크기 10^{-1} m/sec 보다 매우 작은 10^{-4} m/sec 정도의 속도 크기를 갖기 때문에 전체 유동에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.



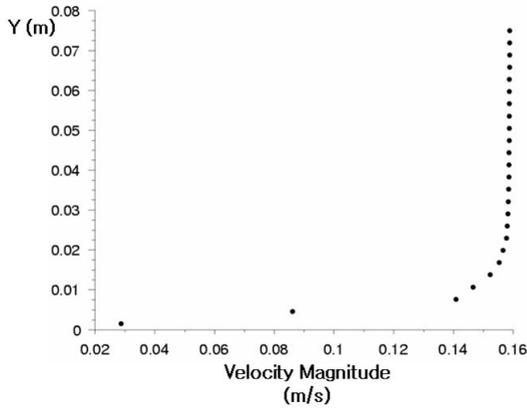
(a) 수직 방향 속도 분포(V_y)

(b) 수평 방향 속도 분포(V_z)

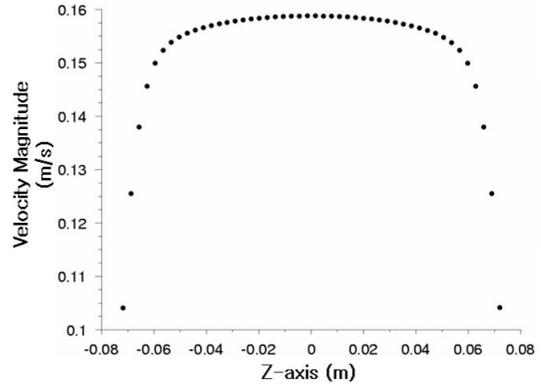
<그림 9> 시험부 단면의 Y-Z 방향 속도 분포 (m/s)



<그림 10> 속도 벡터 (시험부 단면)



(a) 수직 위치별 (Y-방향)



(b) 수평 위치별 (Z-방향)

<그림 11> 위치별 X-방향 속도 분포 (시험부 단면)

<그림 11>은 시험부의 수직 위치별 속도분포와 수평 위치별 속도분포를 나타낸 것이다. (a)의 수직 위치별 분포는 아랫부분의 벽면, (b)의 수평 위치별 분포는 좌·우측 수동의 벽면에 의한 경계층을 잘 보여준다.

본 연구는 유동의 균질성을 정량적으로 판단하기 위해 표준편차의 개념을 도입하였는데, 자유흐름의 99% 유속 분포까지의 경계층 두께를 계산하여 경계층 부분의 면적을 제외하였다. 균질도 계산에 사용된 식은 다음과 같다.

$$S_v = \sqrt{\left(\frac{\int (v - \bar{v})^2 dA}{A} \right) / \bar{v}} \times 100\% \quad (7)$$

위의 식을 이용한 계산 결과 평균 유속이 14.8cm/sec 일 때, 유동의 균질도 S_v 는 6.0%이다. 이때 최대 유속은 15.9cm/sec 최소 유속은 13.6cm/sec로 평균 유속의 -8.2 ~ +7.5% 범위를 보인다.

V. 결 론

본 연구에서는 유동의 균질성이 유동 가시화 실험 결과의 정확도에 영향을 미칠 수 있으므로 수동(water tunnel)의 유동 형태를 파악하고, 시험부의 유동 균질성을 계산하였다.

허니컴과 스크린, 다공판에 대해서는 전산유동해석의 계산 시간 단축을 위해 집중변수모델(Lumped Parameter Model)을 적용하였다. 집중변수모델의 입력 값의 타당성을 입증하기 위해 실제 형상 그대로 구현하여 계산한 결과와 집중변수모델을 사용한 결과를 비교함으로써 계산 결과의 신뢰성을 높였다.

수동의 유동 형태는 정체실에서 복잡한 흐름을 보이지만, 허니컴과 스크린으로 구성된

유동 균일화 장치와 수축부를 지나면서 시험부에서는 상당히 균일해지는 것을 정성적으로 파악되었다. 또한 본 연구는 표준 편차의 개념을 도입하여 수동 시험부의 유동 균질성을 정량적으로 평가하였다.

참 고 문 헌

- 1) Jewel B. Barlow, William H. Rae, Jr., Alan Pope, "Low Speed Wind Tunnel Testing", 3rd ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, 1999.
- 2) <http://www.rollinghillsresearch.com/>
- 3) 손명환, 장조원, "공군사관학교 중형 아음속 풍동의 성능해석 및 건설공정에 관한 연구", 공사논문집, 제31집, 1992. 5, pp. 323 ~ 362.
- 4) Pantankar, S. V. "Numerical heat transfer and fluid flow," Hemisphere publishing, Washington, 1980.
- 5) FLUENT V.5, User's Guide, FLUENT INCORPORATED. Vol. 1, pp.6: 103 ~ 121, 1999.
- 6) FLUENT V.5, User's Guide, FLUENT INCORPORATED. Vol. 1, pp.6: 142 ~ 144, 1999.