

PIV 기법을 이용한 모형철도터널 직관덕트에서 유동 분포 계측 및 수치해석 결과와의 비교분석

장 용 준,^{*1} 정 우 성,² 박 일 순²

MEASUREMENT OF FLOW DISTRIBUTION IN A STRAIGHT DUCT OF RAILWAY TUNNEL MOCK-UP USING PIV AND COMPARISON WITH NUMERICAL SIMULATION

Y.J. Jang,^{*1} W.S. Jung² and I.S. Park²

The turbulent flows in a tunnel mock-up(10L×0.5W×0.25H m³ : scale reduction 1/20) with rectangular cross section were investigated. The instantaneous velocity fields of Re = 49,029, 89,571 were measured by the 2-D PIV system which is consisted of double pulsed Nd:Yag laser and the tracer particles in the straight-duct mock-up where the flows were fully developed. The mean velocity profiles were taken from the ensemble averages of 1,000 instantaneous velocity fields. Simultaneously, numerical simulations(RANS) were performed to compare with experimental data using STREAM code. Non-linear eddy viscosity model (NLEVM : Abe-Jang-Leschziner Eddy Viscosity Model) was employed to resolve the turbulent flows in the duct. The calculated mean velocity profiles were well compared with PIV results. In the log-law profiles, the experimental data were in good agreement with numerical simulations all the way to the wake region except the viscous sub-layer (near wall region).

Key Words : 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry : PIV), 층류 저층(Viscous sublayer), 비선형 난류 모델(Non-Linear Eddy Viscosity Model : NLEVM)

1. 서 론

철도수요의 증가 및 건설기술의 발달로 인하여 철도터널이 더욱 장대해지고, 대심도화 됨에 따라 철도터널 내에서 화재가 발생했을 때 인명 피해와 터널구조의 손상 가능성이 더욱 커지고 있다[1,2]. 철도터널 화재에서 축 방향(longitudinal direction)의 유동은 제연 팬 제어에 있어서 중요한 변수 중 하나이며 이 유동을 파악하는 것은 터널 화재연구에 있어서 중요한 관심이 되고 있다[3,4].

2006년에 고시가 된 「철도시설 안전세부기준」(건설교통

부고시 제2006호-395호)에 의하면 10 km 이상의 철도터널을 건설할 경우 터널의 축소모형을 이용한 모의화재 실험을 실시하여 철도터널 내부의 화재에 대한 안전성 분석을 수행하도록 규정하고 있다.

철도터널에서 화재가 발생하면 적절한 제연시스템을 이용하여 열·연기를 고립시키고 승객을 안전하게 대피하도록 되어 있으며, 철도터널의 설계 시 실험을 통하여 이러한 제연시스템을 검증하여야만 한다. 기존의 열부력 장치를 이용하여 모형 시험을 하는 경우 실제상황과 동일한 고온의 온도까지 온도를 증가시킬 수 없으므로 실질적인 열부력 현상을 모사하기가 어렵다. 최근에는 이러한 문제를 해결하고자 Vauquelin & Wu[5] 등은 헬륨가스를 이용하여 모형 터널 내에서 열부력을 성공적으로 모사하였다. 헬륨의 경우 밀도가 낮아 적절히 공기와 혼합하면 철도 터널 화재의 열부력 현상과 유사한 현상을 모사할 수 있는 것으로 밝혀졌다.

한편 터널 내에서의 유동 현상을 연구하기 위하여 여러 연

접수일: 2010년 6월 10일, 수정일: 2010년 8월 18일,

게재확정일: 2010년 8월 20일.

1 정회원, 한국철도기술연구원, 철도환경연구실

2 한국철도기술연구원, 철도환경연구실

* Corresponding author, E-mail: jangyj@krii.re.kr

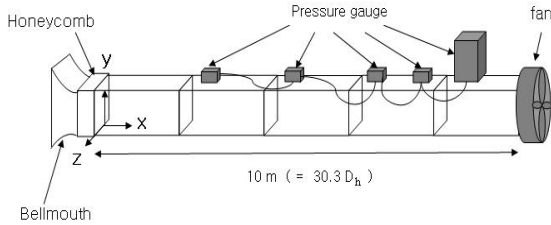


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

구자들이 직관 및 원관 덕트에서 다양한 실험을 수행하여 왔다. Klein[6]은 다양한 원관 유동에 관한 많은 실험 결과를 분석하여 보고하였으며, 난류 평균 유동 및 난류량을 계측한 결과를 비교하였다. Humphrey[7] 등은 정사각단면을 갖는 덕트에서의 난류유동에 대하여 LDV를 이용하여 평균 유동 및 난류량을 계측하였다. Maeng[8] 등은 직사각형 단면을 갖는 덕트 내의 3차원 난류 유동을 열선 유속계를 이용하여 계측하였고 90° 곡관 내에서의 난류량도 계측하였으나 벽 근처에서의 유동장은 계측하지 못하였다. Sohn[9] 등은 곡관에 연결된 직관 덕트에서 층류유동에 대하여 연구하였다.

최근 들어 유동장 계측에 사용되는 PIV(Particle Image Velocimetry) 기술은 매우 빠르게 발전을 하고 있으며 PIV의 속도장 측정기술은 유동장, 특히 전체 유동장 연구에 많은 도움을 주고 있다[10]. 과거에는 난류 유동을 측정하기 위해서 열선유속계(Hot Wire Anemometry)[8] 또는 LDV(Laser Doppler Velocimetry)[7] 등을 이용하여 공간의 한 점(point-by-point)만을 계측하였지만, PIV는 전체 관측창(Field of View)의 속도장을 일시에 계측하여 대용량 하드디스크에 저장하므로 과거보다 더욱 신속 정확하고 폭넓은 연구를 할 수 있게 되었다[11].

본 논문에서는 이러한 PIV 기술을 이용하여 모형 철도터널에서 축 방향의 유동에 대하여 연구를 수행하였다. 터널모형 내부에서 제연시스템 또는 자연풍에 의하여 발생하는 유동이 터널 내에 존재할 때 완전히 발달된 유동에 대하여 평균 속도 유동장을 계측하였으며, 이를 이론식과 비교하여 계측의 정확성을 고찰하였다. 또한 STREAM code [12,13]를 이용하여 수치해석을 수행하고 실험 결과 및 이론식과 종합적으로 비교 평가하여 PIV 기술의 정확성 및 개선 사항에 관하여 논하였다.

2. 실험적 연구

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험에 사용된 장치의 개략도이다. 이 모델 직관 덕트는 $10^L \times 0.5^W \times 0.25^H$ m³이며 투명한 아크릴로 제작되었다.

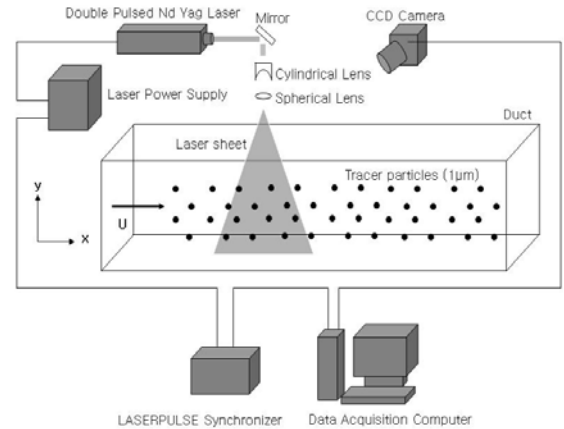


Fig. 2 Configuration for the PIV measurement in a straight duct

모델 터널(모델 직관덕트)의 입구속도는 터널에서 발생가능한 속도인 $U=2.08$ m/s ($Re=49,029$) 와 3.8 m/s ($Re=89,571$)를 사용하였다.

덕트 입구에는 벨 마우스가 설치되어 있고 그 뒤에 허니컴이 있어서 덕트 입구에서 난류 유동이 생성되도록 하였으며 출구쪽에는 흡입형(suction type) 송풍기를 장착하였다. 이 실험에 사용된 작동유체는 공기(air)이며 추적입자는 직경이 1μ m 크기의 올리브 오일을 사용했다. 추적입자가 라스킨 노즐에서 seeding 장치(Oil Droplet Generator, TSI's Model 9307)를 통해 덕트의 입구에서 작동유체와 함께 직관 덕트 안으로 흘러가도록 되어있다. 레이저 빛은 렌즈를 지난 후 얇고 넓게 퍼지는 laser sheet으로 형성되어 덕트의 가운데를 지나서 유동을 비추게 되며 CCD 카메라는 추적입자에서 나온 산란광의 이미지를 기록하게 된다(Fig. 2).

본 실험에 사용된 입자영상유속계(PIV)는 이중 펄스 Nd:Yag Laser 레이저 시스템(Newwave, 120 mJ/Pulse, $\lambda=532$ nm)과 1600×1200 pixel의 디지털 CCD 카메라(TSI, 32 fps), 동기화장치(TSI 610035)와 듀얼 펜티엄 컴퓨터로 구성되어 있다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 직관덕트에서 난류유동을 발생시킨 후 정해진 무차원 축방향위치(x/D_h)와 레이놀즈 수에서 난류의 유동이 어떻게 x-y단면에서 완전 발달되었는지를 2차원 PIV 계측기로 측정하고 Log-Law 이론식 및 non-linear $k-\epsilon$ 모델을 이용한 수치해석의 결과와 비교 분석하였다. PIV 관측창(Field of View)의 면적은 약 $0.33^W \times 0.25^H$ m²이며 속도벡터의 추출 알고리즘(Insight 3G : TSI) [14]은 상호상관기법(cross correlation)을 사용하였다.

3. 수치해석적 연구

3.1 지배방정식

비압축성 난류 유동장의 지배방정식은 다음과 같다.(연속 방정식, 운동량 방정식(Navier-Stokes), 난류 운동에너지(k) 방정식, 난류 에너지 소산율(ϵ) 방정식)

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\bar{U}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] \quad (2)$$

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \left(k' + \frac{p}{\rho} \right) u_j \right] - \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{D\epsilon}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} - \overline{\epsilon' u_j} - \frac{2\nu}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ & - C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} f_{\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, \bar{U}_i 는 평균속도, \bar{P} 는 평균 압력, p 는 압력 요동, u_i 는 난류 요동, $k' = u_i u_i / 2$, $\epsilon' = \nu (\partial u_i / \partial x_i) (\partial u_i / \partial x_i)$, $k = \overline{k'}$, $\epsilon = \overline{\epsilon'}$ 이다. 식 (4)에서 $C_{\epsilon 1}$ 과 $C_{\epsilon 2}$ 는 모델 상수이고 f_{ϵ} 는 벽근처 영역에서 물리적 요구를 만족시키는 모델함수이다.

3.2 레이놀즈응력 모델링

본 연구에서 RANS 계산을 위하여 Abe, Jang & Leschziner [15,16] 등에 의하여 개발된 비선형(non-linear) $k - \epsilon$ 난류 모델(NLEVM)인 AJL 모델을 사용하였다. 이 모델에서 레이놀즈 응력($\overline{u_i u_j}$)에 대한 비등방성 텐서(b_{ij} : anisotropy tensor)의 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{Db_{ij}}{Dt} = & \frac{1}{2k} \left[\left(P_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right) + \Phi_{ij} - \left(\epsilon_{ij} - \frac{2}{3} \epsilon \delta_{ij} \right) \right] \\ & - \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{P_k}{\epsilon} - 1 \right) b_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

$$b_{ij} = \frac{\overline{u_i u_j}}{2k} - \frac{\delta_{ij}}{3}$$

$$P_{ij} = -\overline{u_i u_k U_{j,k}} - \overline{u_j u_k U_{i,k}}, \quad (6)$$

$$P_k = P_{ii} / 2 = -\overline{u_i u_k U_{i,k}}$$

$$\Phi_{ij} = \frac{p}{\rho} (\overline{u_{i,j} + u_{j,i}}), \quad \epsilon_{ij} = 2\nu \overline{u_{i,k} u_{j,k}}$$

여기서 P_{ij} 는 레이놀즈 응력의 생성항, P_k 는 난류 에너지의 생성항, Φ_{ij} 는 압력 스트레인 상관관계, ϵ_{ij} 는 소산율 텐서를, $\overline{U_{i,j}}$ 는 $\partial \bar{U}_i / \partial x_j$ 를, δ_{ij} 는 크로네커 델타를 의미한다.

식 (5)를 국부 평형상태($Db_{ij} / Dt = 0$)에 적용한 후 전개하면 다음과 같이 b_{ij} 에 대한 해를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} b_{ij}^* = & \frac{1}{1 + \frac{22}{3} \Omega^{*2} + \frac{2}{3} (\Omega^{*2} - S^{*2}) f_B} \\ & \left\{ -S_{ij}^* - 2(S_{ik}^* \Omega_{kj}^* - \Omega_{ik}^* S_{kj}^*) + 2(S_{ik}^* S_{kj}^* - \frac{\delta_{ij}}{3} S^{*2}) \right\} \\ S_{ij} = & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right), \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$b_{ij}^* = C_D b_{ij}, \quad S_{ij}^* = C_D \tau S_{ij}, \quad \Omega_{ij}^* = C_D \tau \Omega_{ij} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{\nu_t}{k}, \quad \nu_t = C_{\mu} f_{\mu} \frac{k^2}{\epsilon}, \quad C_D = 0.8, \quad C_{\mu} = 0.12 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} f_B = & 1 + C_{\eta} (\Omega^* - S^*) \\ S^{*2} = & S_{mn}^* S_{mn}^*, \quad \Omega^{*2} = \Omega_{mn}^* \Omega_{mn}^*, \\ S^* = & \sqrt{S^{*2}}, \quad \Omega^* = \sqrt{\Omega^{*2}}, \quad C_{\eta} = 100 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, S_{ij} 는 strain-rate 텐서, Ω_{ij} 는 vorticity 텐서이다.

벽 근처에서 점성으로 인한 감쇠효과를 나타내기 위한 감쇠 함수(f_{μ})는 다음과 같다.

$$f_{\mu} = \left[1 + \frac{35}{R_t^4} \exp \left\{ - \left(\frac{R_t}{30} \right)^{\frac{3}{4}} \right\} \right] \{ 1 - f_w(26) \} \quad (11)$$

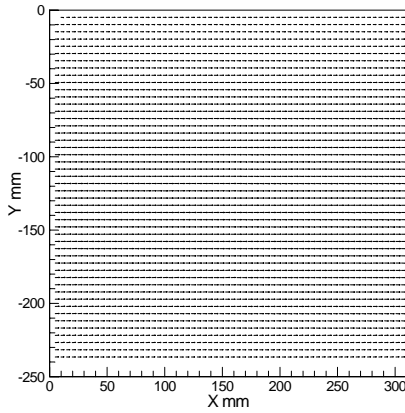


Fig. 3 Measured average velocity vector map for Re=89,571 at $x/D_h=22.7$ using PIV

$$f_w(\xi) = \exp\left\{-\left(\frac{n^*}{\xi}\right)^2\right\} \quad (12)$$

식 (11)와 (12)에서 $R_t(=k^2/\nu\epsilon)$ 는 난류 레이놀즈수이고 $n^*(=u_\epsilon n/\nu)$ 는 무차원화된 벽면 거리(wall distance)이다.

식 (7)은 선형과 비선형으로 다음과 같이 분리할 수 있다.

$$b_{ij}^* = {}^1b_{ij}^* + {}^2b_{ij}^* \quad (13)$$

여기서,

$$\begin{aligned} {}^1b_{ij}^* &= -C_B S_{ij}^*, \\ {}^2b_{ij}^* &= -2C_B(S_{ik}^* \Omega_{kj}^* - \Omega_{ik}^* S_{kj}^*) + 2C_B\left(S_{ik}^* S_{kj}^* - \frac{\delta_{ij}}{3} S^{*2}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, 모델상수 C_B 는

$$C_B = \frac{1}{1 + \frac{22}{3} \Omega^{*2} + \frac{2}{3} (\Omega^{*2} - S^{*2}) f_B} \quad (15)$$

좀 더 상세한 관계식은 참고자료[15]에 기술되어 있다.

3.3 수치해석 방법 및 수치기법

벽면 경계조건으로 점착조건(no-slip condition)을 적용하였

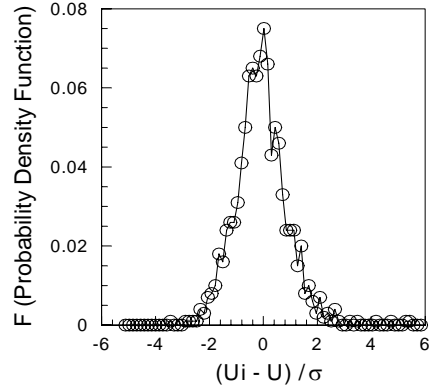


Fig. 4 Probability density function (F) of Re = 89,571 at $x/D_h=22.7$ about the central point of FOV(Field of View)

으며 벽근처에서 y^+ 값은

$$y^+ (= \frac{y u_\tau}{\nu}) \leq 1 \quad (16)$$

로 유지하여 층류저층(viscous sublayer)에서도 유동해석을 수행하였다.

RANS 계산은 비 직교 좌표계(non-orthogonal), 집중 격자계(collocated) 및 FVM을 사용한 STREAM[12,13] code를 사용하여 수행되었다. 평균 유동과 난류 양의 대류(convection)는 QUICK scheme의 second-order TVD 근사 법[13]을 사용하여 계산되었다. 질량 보전(mass conservation)을 위하여 압력을 수정하는 알고리즘을 채택하였다. 이러한 방법들을 이용하여 수송방정식과 압력 수정 방정식을 순차적으로 풀었으며, 해가 수렴할 때 까지 반복하여 계산하였다. 계산은 Sun 계열의 워크스테이션(CPU : AMD OPT848)에서 수행되었다.

4. 결과분석

길이 10 m의 직사각형 덕트 내부의 난류유동을 입구로부터 $x/D_h=22.7$ 인 위치에서 측정하였다. 각각의 위치에서 Re=49,029와 Re=89,571에 해당하는 유동을 무차원 x축방향과 y축 방향에 대해서 난류의 순간 속도장을 PIV 시스템으로 각각 1000장씩 측정한 후 그 평균 속도장을 Insight 3G Program(TSI incorporated)과 Tecplot으로 구했다.

Fig. 3은 본 실험에서 구한 평균 속도장(Mean Velocity Field)으로 $x/D_h=22.7$ 인 곳에서 Re=89,571의 유동을 PIV로 측정한 것이다. 유동의 평균속도에서 y축 방향성분이 거의 다

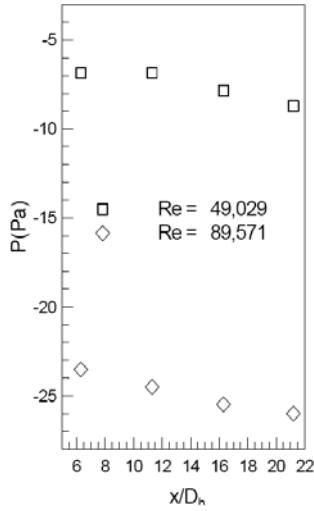


Fig. 5 Measurement of pressure distribution along the duct wall

사라지고 x축 방향만 남은 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 순간 속도장에서 관측창(FOV) 중앙 위치의 속도 data 1000개를 확률밀도함수로 나타낸 것인데 평균값을 중심으로 확률밀도함수가 가우스 분포(Gaussian Distribution)와 매우 유사하게 형성되고 있는 것을 볼 수 있다.

$$\bar{U} = \sum_{i=1}^N U_i / N \tag{17}$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2 / N \tag{18}$$

여기서 U_i 는 각각의 속도 data이고 N은 총 속도 data의 개수이며 σ 는 표준 편차이다.

본 실험에 사용된 덕트는 송풍기가 덕트의 출구에 있는 흡입형(suction type)이며, Seeding 장치는 덕트 입구에 설치하였다. 덕트 유동에서는 추적입자(olive oil)가 덕트의 상류(upstream)에서보다 하류(downstream)에서 더욱 활발하게 작동 유체와 혼합되었다. 따라서 상류의 위치보다 하류의 위치에서 PIV 시스템으로 속도벡터를 더 정확히 계측할 수 있었으며, 추적입자를 상류에서도 균질하게 작동유체와 혼합시킬 수 있는 기술이 PIV 실험의 노하우 중 하나라고 판단된다. 또한 seeding 장치중 하나인 라스킨(Laskin) 노즐의 압력이 추적입자를 방출할 때 추적입자가 균질한 압력으로 덕트 전단면에 걸쳐 방출되도록 하는 장치를 제작하였다. Laser sheet가 투명한 아크릴 재질의 덕트 윗면과 아랫면을 투과할 때 이 투과

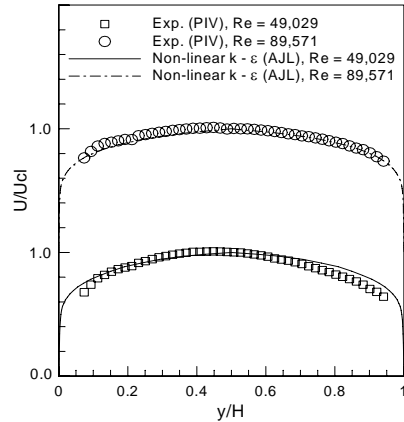


Fig. 6 Calculated and measured centerline-mean-velocity profiles at $x/D_h = 22.7$

된 면에서 반사광이 나와 벽면 근처의 입자 측정을 방해하는 반사효과 문제는 Laser sheet와 CCD 카메라의 측정방향을 미세하게 조절하고, 빛을 흡수하는 특수 페인트(무반사, 무광)를 사용하여 반사효과를 부분적으로 제거할 수 있었다.

Fig. 5는 덕트 안에서 유동이 있을 때 압력의 변동을 차압계(Differential pressure gauge : 측정범위 $\pm 15\text{mmH}_2\text{O}$: 측정오차=1%)를 이용하여 측정한 것이다. $Re=49,029$ 와 $Re=89,571$ 에서 압력강하율(기울기)은 거의 비슷한 경향을 보이고 있었으나, $Re=89,571$ 에서의 압력강하가 $Re=49,029$ 에 비하여 약 4-5 배 정도 더 큰 것을 볼 수 있다. 이는 베르누이 방정식과 일치하는 결과이다. 본 실험에 사용된 송풍기는 $90 \text{ m}^3/\text{min}$ 의 송풍량 및 37 mmAq 의 정압을 갖고 있다.

한편 Kays & Crawford[17]의 덕트 난류유동에 대한 입구길이(Entrance length)에 대한 식

$$(x/D_h)_{entry} = 0.623 Re^{0.25} \tag{19}$$

에 따르면 $Re=49,029$ 와 $Re=89,571$ 를 갖는 난류유동의 입구길이(x/D_h)는 각각 9.3과 10.8이 되므로 이 위치의 후류에서 완전히 발달된 난류가 형성 된다고 판단된다. 따라서 속도장이 계측된 $x/D_h > 22$ 지역은 유동이 완전히 발달이 된 위치이다. 이는 Fig. 5에서도 확인이 가능하다.(기울기의 변화 없음)

Fig. 6은 덕트에서 non-linear $k-\epsilon$ 을 이용한 RANS 해석 결과 및 PIV를 이용하여 덕트 중심면에서 계측한 축방향 평균 유동장을 서로 비교하였다. 축방향 평균 속도는 중심점 속도(U_{cl})로 무차원하여 표현 하였으며, $x/D_h=22.7$ 의 위치에서 덕트 유동이 완전히 발달된 것을 볼 수 가 있다. $Re=89,571$ 일

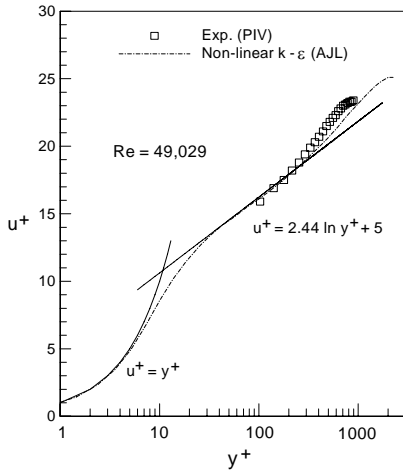


Fig. 7 Log-law profiles (Re=49,029) of non-linear $k-\epsilon$ (AJL), experiments(PIV) and theory at $x/D_h = 22.7$

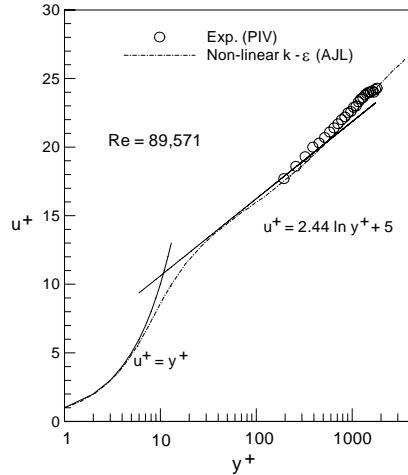


Fig. 8 Log-law profiles (Re=89,571) of non-linear $k-\epsilon$ (AJL), experiments(PIV) and theory at $x/D_h = 22.7$

경우 PIV로 계측한 축방향 평균 속도장이 벽 근처를 제외 RANS의 결과와 매우 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 덕트 양쪽 벽면 근처에서 PIV 계측 data가 부재인 것은 덕트 벽면에서 laser 빛의 반사 효과로 인하여 data가 손상을 입어 error 벡터가 발생하였기 때문이다. 일반적으로 PIV를 이용하여 벽면 근처에서의 속도 벡터를 정확히 계측하는 것은 쉽지 않은 기술로 알려져 있다[11]. Re=49,029일 경우도 비슷한 경향을 보이고 있으나, 한 쪽 벽면 근처에서 PIV계측 결과가 RANS 해석 결과에 비교하여 조금 벗어나는 결과를 보이고 있는데 이는 덕트 입구에 설치된 주체입자를 분출시키는 라스킨(laskin) 노즐에 의하여 유동이 간섭을 받기 때문인 것으로 추측된다. Re=89,571일 경우에 이러한 현상이 없는 것은 고속의 유동장에서는 라스킨(laskin) 노즐의 영향이 무시되기 때문이다.

Log-law 선도를 이용하여 PIV계측 data를 분석하여 보면 난류유동의 어느 부분이 계측 가능하고 어느 부분이 어려운지를 더욱 분명히 판단할 수 있다.

Fig. 7 과 Fig. 8은 PIV계측 data를 $u^+(y^+)$ 선도를 이용하여 RANS 및 이론식과 비교 분석한 그림이다. 여기서 $u^+ = u/u_\tau$, $y^+ = yu_\tau/\nu$ 로 정의되며, u_τ 는 friction velocity 이다. Kays & Crawford[17]에 의하면 마찰 계수 c_f (friction coefficient)는 다음 식으로부터 계산이 되므로

$$c_f/2 = 0.023Re^{-0.2} \tag{20}$$

u_τ 는 각각 $u_\tau=0.107(Re=49,029)$, $u_\tau=0.184(Re=89,571)$ 가

된다. 난류이론에 의하면, 층류 저층(laminar sublayer or viscous sublayer or inner zone)에서는 $u^+ = y^+$ 가 성립하고, 그 이상의 층에서는 log-region 이라 불리며, law of the wall (벽 법칙) 즉 $u^+ = 2.44 \ln y^+ + 5$ 이러한 관계식이 성립된다. law of the wall을 벗어나는 지역(여기서는 약 $y^+ > 600$ 이상 지역)은 wake-region(후류 지역)이라고 한다.

Fig. 7에서 non-linear $k-\epsilon$ 을 이용한 RANS의 계산은 law of the wall 이론식과 매우 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 PIV를 이용하여 계측한 축 방향 평균속도도 이론식 및 RANS의 결과와 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 앞서서도 논의하였듯이 층류 저층에서는 레이저 빛의 반사 효과로 인하여 data의 손실이 있었으며, log-region의 일부 부분에서도 손실이 있는 것으로 확인이 되었다. 이는 Eggels 등 [11]이 PIV를 이용하여 경계층 유동을 계측한 data와도 일치하는 것으로 층류 저층에서는 PIV를 이용한 계측이 쉽지가 않다는 결론을 내리고 있다. 일반적으로 층류 저층의 경계층 유동을 정확히 계측하려면 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 사용하는 것이 추천되고 있다. Fig. 8에서도 PIV 실험 data가 RANS 및 이론식과 일치하는 것을 볼 수가 있으며, log-region 뿐만 아니라 후류 지역(wake region)에서도 수치해석 결과와 동일한 결과를 보이고 있다.

5. 결 론

철도 터널 내부에서 발생하는 기류를 연구하기 위하여 모형 터널($10^1 \times 0.5^W \times 0.25^H \text{ m}^3$)을 제작하고, PIV(Nd:Yag Laser, TSI)

기술을 이용하여 모형 터널 내부에서 발생하는 축 방향 난류 유동($Re=49,029$, $Re=89,571$) 및 완전히 발달된 위치($x/D_h = 22.7$)에서 평균 속도 유동장을 계측하였다. 또한 동일한 모형 터널내에서의 유동 현상에 대하여 STREAM code[12,13]를 이용하여 RANS 수치해석을 수행하고, 실험 결과와 비교 분석하였다. 난류유동을 해석하기 위해서는 Abe-Jang-Leschziner AJL[15,16] 등에 의하여 개발된 비선형 (non-linear) $k-\epsilon$ 난류 모델(NLEVM)을 사용하였다. 계측된 평균 속도 유동장은 수치해석 결과와 잘 일치가 되었으나, 벽 근처에서 난류 유동장을 계측하는데 기술적인 어려움이 있었다. 반면, AJL 난류 모델[15]을 이용하여 수치해석한 결과는 log-law 지역 및 후류 지역에서 실험 결과와 매우 잘 일치하였을 뿐만 아니라, 벽 근처(층류 저층)에서의 유동현상($u^+ = y^+$)도 이론식과 비교하여 정확히 예측할 수 있었다. 본 연구를 통하여 터널 환기 및 화재 유동에 대한 연구의 심화가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- [1] 2008, Jang, Y.J., Lee, C.H., Park, W.H. and Jung, W.S., "The Passenger Evacuation Simulation Using Fluent and EXODUS," *J. of the Korean Society for Railway*, Vol.11, No.1, pp.95-100.
- [2] 2008, Jang, Y.J., Kim, H.B., Lee, C.H. and Jung, W.S., "The Study on Fire Phenomena in the Deeply Underground Subway Station," *2008 Spring Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway*, pp.1760-1767.
- [3] 2009, Jang, Y.J., Kim, H.B., Kim, J.H. and Han, S.Y., "Comparative Study on The Numerical Simulation for The Back-Layer of The Tunnel Fire-Driven Flow with LES and RANS," *T. of the KSME(B)*, Vol.33, pp.156-163.
- [4] 2009, Jang, Y.J., Lee, C.H., Kim, H.B. and Jung, S.W., "The Examination of Accuracy of Fire-Driven Flow Simulation in Tunnel Equipped with Ventilation," *J. of Computational Fluids Engineering*, Vol.14, No.3, pp.115-122.
- [5] 2006, Vauquelin, O. and Wu, Y., "Influence of tunnel width on longitudinal smoke control," *Fire Safety Journal*, Vol.41, pp.420-426.
- [6] 1981, Klein, A., "REVIEW: Turbulent Developing Pipe Flow," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol.103, pp.243-249.
- [7] 1981, Humphrey, J.A.C., Whitelaw, J.H. and Yee, G., "Turbulent Flow in a Square Duct with Strong Curvature," *J. of Fluid Mechanics*, Vol.103, pp.443-463.
- [8] 1991, Maeng, J.S., Jang, Y.J. and Lyu, M.S., "Experimental Study of Three Dimensional Turbulent Flows in a 90° Rectangular Cross Sectional Strongly Curved Duct," *T. of The Korea Society of Mechanical Engineers*, Vol.15, pp.262-273.
- [9] 2004, Sohn, H.C., Lee, H.N., Park, G.M. and Lee, H.G., "A Study on the Axial Velocity Profile of Developing Laminar Flows in a Straight Duct Connected to a Square Curved Duct," *T. of the KSME(B)*, Vol.28, pp.1058-1065.
- [10] 2001, Lee, M.B. and Kim, K.C., "A Study on the Near Wake of a Square Cylinder Using Particle Image Velocimetry," *T. of the KSME*, Vol.25, No.2, pp.48-53.
- [11] 1994, Eggels, J.G.M., Unger, F., Weiss, M.H., Westerweel, J., Adrian, R.J., Friedrich, R. and Nieuwstadt, F.T.M., "Fully developed turbulent pipe flow: a comparison between direct numerical simulation and experiment," *J. of Fluid Mechanics*, Vol.268, pp.175-209.
- [12] 1994, Lien, F.S. and Leschziner, M.A., "A general non-orthogonal collocated finite algorithm for turbulent flow at all speeds incorporating second-moment turbulence-transport closure, Part I: Computational implementation," *Comput. Methods Appl. Mech. Engr.*, Vol.114, pp.123-148.
- [13] 1994, Lien, F.S. and Leschziner, M.A., "Upstream monotonic interpolation for scalar transport with application to complex turbulent flows," *Int. J. of Numerical Methods in Fluids*, Vol.19, pp.527-548.
- [14] 2007, TSI incorporated, *Insight 3GTM Data Acquisition, Analysis, and Display Software Platform User's Guide*, TSI incorporated, Minnesota.
- [15] 2003, Abe, K., Jang, Y.J. and Leschziner, M.A., "An Investigation of wall-anisotropy expressions and length-scale equations for non-linear eddy-viscosity models," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol.24, pp.181-198.
- [16] 2002, Jang, Y.J., Leschziner, M.A., Abe, K. and Temmerman, L., "Investigation of anisotropy-resolving turbulence models by reference to highly-resolved LES data for separated flows," *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol.69, pp.161-203.
- [17] 1993, Kays, W.M., Crawford, M.E. and Weigand, B., *Convective Heat and Mass Transfer, Third edition*, McGraw Hill.