

LES를 이용한 판토틀라프 팬헤드의 와 흘림 현상 해석

장 용 준¹

ANALYSIS OF VORTEX SHEDDING PHENOMENA AROUND PANTOGRAPH PANHEAD FOR TRAIN USING LARGE EDDY SIMULATION

Yong-Jun Jang¹

The turbulent flow and vortex shedding phenomena around pantograph panhead of high speed train were investigated and compared with available experimental data and other simulations. The pantograph head was simplified to be a square-cross-section pillar and assumed to be no interference with other bodies. The Reynolds number (Re) was 22,000. The LES (large eddy simulation) of FDS code was applied to solve the momentum equations and the Wener-Wengle wall model was employed to solve the near wall turbulent flow. Smagorinsky model ($C_s=0.2$) was used as SGS (subgrid scale) model. The total grid numbers were about 9 millions and the analyzed domain was divided into 12 multi blocks which were communicated with each other by MPI. The time-averaged mainstream flows were calculated and well compared with experimental data. The phased-averaged quantities had also a good agreement with experimental data. The near-wall turbulence should be carefully treated by wall function or direct resolution to get successful application of LES methods.

Key Words : LES (Large Eddy Simulation), 와 흘림 (Vortex shedding), 벽 법칙 (Wall law or Wall function), 위상 평균 (Phase average), 벽 난류 (Near-wall turbulence), 판토틀라프 (Pantograph)

1. 서 론

한국형 고속전철(KTX)의 주행 속도는 현재 300km/h를 유지하고 있으며, 이와 같은 고속주행으로 인하여 나타나는 판토틀라프 이선률 증가 현상으로 안정적이고, 연속적인 전력 공급에 지장을 받는 문제가 발생할 수 있다[1]. 판토틀라프 개발에 있어서 일정한 압상력을 유지하여 이선율을 줄이는 것은 중요한 과제가 된다[2]. 고속 주행시에는 판토틀라프에 가해지는 공기역학적인 하중이 속도에 비례하여 증가하므로 판토틀라프 압상력에 대한 공기역학적 기여가 급격하게 증가하게 된다. 따라서, 고속철도 차량용 판토틀라프의 집전 성능

을 안정적으로 유지하기 위해서는 판토틀라프 주변의 유동현상을 정확히 분석할 필요가 있다.

판토틀라프 주변에서 발생하는 유동의 특성은 점성이며 비정상 난류유동이다. 일반적으로 점성유동의 경우 레이놀즈수가 $100 \leq Re \leq 106$ 의 범위에서 난류 유동의 발생으로 인하여 물체 후방으로 규칙적인 와 흘림(Vortex Shedding)이 생성되고 소멸되는 모습을 보이게 된다[3]. 이와 같은 유동의 변화는 공력(항력 및 양력)의 변화를 발생시키게 된다.

판토틀라프의 공력을 연구하기 위하여 Rho 등[1]은 아음속 풍동실험 통하여 사각주와 원통형 팬헤드의 공력 특성을 비교 분석하였다. 또한 Rho 등[2]은 팬헤드의 주변에서 발생하는 와 흘림(Vortex Shedding)을 감소시키기 위해 팬헤드의 2차원 형상최적화를 시도하였다. Kwon 등[4]은 실대형 판토틀라프를 풍동내에 장착하여 실제 가선에서 가해지는 압상력을 로드셀을 이용하여 계측하였으며, 주행방향, 집전 높이, 날개 형상 등 다양한 운용 조건에 대하여 실험하였다. Kim 등[5]은

접수일: 2011년 2월 10일, 수정일: 2011년 4월 1일,

게재확정일: 2011년 4월 6일.

1 정회원, 한국철도기술연구원 철도환경연구실

E-mail: jangyj@krri.re.kr

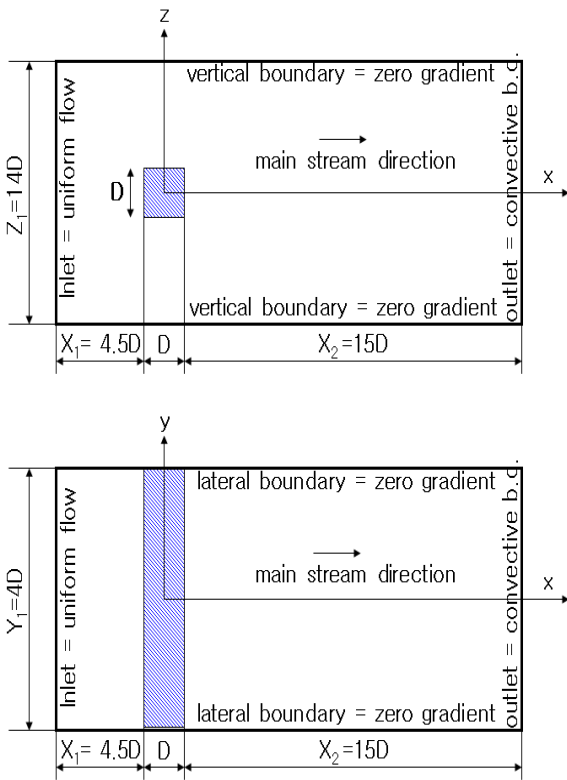


Fig. 1 The geometry of the simplified pantograph head and indication of the various geometric lengths

KTX에 장착되는 판토티그래프에 대하여 풍동실험 및 현차 실험을 통하여 압상력을 계측하고 이를 비교 분석하였다.

한편 판토티그래프의 팬헤드와 모양이 유사한 사각주 주위에서의 와 흘림 현상에 대하여 연구를 진행하여 판토티그래프 공력 연구에 도움을 주는 연구자들이 있다. Lyn 등[6,7]은 $Re=22,000$ 의 난류 유동속에 존재하는 2차원 정사각형 주위에서 발생하는 비정상 와 흘림 현상을 LDV(Laser-Doppler Velocimetry)를 이용하여 주유동 및 황방향의 평균 유속 및 난류량을 정확히 계측하였다. Rodi 등[8]은 LES(Large Eddy Simulation) 기법을 이용하여 2차원 정사각형 주위에서의 와 흘림을 해석하였으며, 이를 Lyn 등[6,7]의 데이터와 비교하였다.

본 연구에서는 판토티그래프 팬 헤드를 구성하는 장치 중 팬 헤드 스트립(strip)을 고려치 않고 크로스 바(cross bar)만을 고려한 후 크로스 바의 단면을 정사각형으로 단순 모델화 하였다. 다른 구조물과의 간섭이 존재하지 않는다는 가정하에 팬 헤드 주위에서 발생하는 와 흘림(vortex shedding) 현상을 벽 법칙(wall law)을 사용하는 LES 기법을 이용하여 수치해석적

으로 조사하였으며, Lyn 등[7]의 실험 결과와 비교 분석하였다.

2. 수치해석적 연구

2.1 판토티그래프 헤드 유동 조건 및 수치해석 방법

본 연구의 해석 대상은 Fig. 1과 같이 판토티그래프의 헤드 중 크로스바의 단면을 정사각형으로 단순화시키고 Y 방향(횡방향)으로 무한히 확장시킨 것으로 가정한 형상이다. 한국형 고속철도에 적용된 판토티그래프에 작용하는 레이놀즈수(Re)는 약 2×10^5 정도이지만 이러한 Re 수에 대한 신뢰할 만한 실험 결과가 부재하므로, 본 연구에서는 Lyn 등[7]에 의하여 LDV로 계측된 $Re=2.2 \times 10^4$ 유동 조건하에서의 실험 결과와 비교하였다. 일반적으로 $Re=10^4 \sim 10^5$ 사이의 유동에서는 항력 계수 등의 변화율이 미미하므로 유동의 상사성을 이룬다고 볼 수 있다[3]. Fig. 1에서와 같이 크로스바의 높이(D)를 기준으로 모든 수치를 무차원 하였으며, 입구유동 진입 길이 X_1 은 D 의 4.5배, 크로스바 이후의 하류 유동 계산을 위한 길이 X_2 는 D 의 15배 이상, 유동의 깊이인 종방향(vertical) 길이 Z_1 은 D 의 14배로 하였으며, 크로스바의 끝단의 영향을 무시하고자 무한한 길이로 가정한 횡방향(lateral) 길이 Y_1 을 D 의 4배로 설정하였다.

판토티그래프 헤드 주위의 유동은 Lyn 등[7]의 실험조건과 일치하도록 $Re=22,000$ 로 설정하였다. 입구 경계조건에서 2%의 난류강도가 주어졌으며, 균일 유동(uniform flow)으로 가정하였다. 횡방향(Y) 경계조건으로는 양단 끝에서 대칭 경계조건(symmetry or zero gradient)이 주어졌다. 출구 조건에서는 대류경계조건(convective boundary condition)이 주어졌으며, 여기서 \bar{U} 는 출구 평균 속도이다. 물체의 전체 표면에서는 벽 법칙(wall function)을 적용하였다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial U_i}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

물체 후류에서 발생하는 비정상 와 흘림 현상을 해석하기 위하여 Jang 등[9,10,11]이 사용한 FDS(Fire Dynamics Simulator) 코드의 LES 기법을 사용하였다. 다만 본 연구에 사용한 개선된 코드와 이전에 사용하였던 코드의 다른 점은 벽 법칙(wall function)과 대류 경계조건이 추가 되었다는 점이다. (기존의 FDS 코드의 경우 벽 법칙의 부재로 인하여 정확한 유동 해석에 한계가 있었지만 이번 연구를 통하여 FDS 코드의 유동 해석 성능을 정확히 비교 분석할 수 있으리라 판단된다.) 본 LES 기법에서 직접 해석이 불가능한 작은 와류(eddy)를 해석하기 위해서는 Smagorinsky model을 사용하여 해

석하였다.

2.2 지배방정식 및 수치기법

LES 기법의 경우 Navier-Stokes 방정식을 필터링(filtering)하여 얻었으며[13] 연속방정식, 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도, f 는 부가항(source term)이며, u 는 속도벡터 이다.

τ_{ij} 는 sub-grid scale(SGS) stress 으로서 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_{ij} = \overline{U_i U_j} - \overline{U_i} \overline{U_j} \quad (4)$$

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_t \overline{S_{ij}} \quad (5)$$

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

여기서 U_i 는 평균 유속 속도성분, δ_{ij} 는 크로네커 델타, ν_t 는 난류점성계수이며 모델링 되어야 한다. LES 기법에서는 Smagorinsky model[13,14,15]을 사용하고 있다.

$$\nu_t = (C_s \overline{\Delta})^2 |\overline{S}| \quad (7)$$

$$|\overline{S}| = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \quad (8)$$

$$\overline{\Delta} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (9)$$

그리고 Smagorinsky 상수 $C_s = 0.2$ 가 적용되었다.

2.3 벽면 근처 유동처리 방법 : Werner-Wengle Wall Law(WW)

LES 기법과 함께 벽면 근처(near-wall)에서의 유동을 해석하기 위하여 벽 부착(no slip) 조건을 사용할 경우 DNS(Direct Numerical Simulation) 격자 조건에 버금가는 격자 해상도가 요구되기 때문에[12], 본 연구에서는 LES 기법과 함께 벽 법칙(wall function or wall law)을 적용하였다. 벽 근처의 층류저층(viscous sublayer) 및 log-law 지역에서 Werner-Wengle wall law[14,16]을 적용하여 유동 변수를 계산하였다.

Werner-Wengle wall law는 층류저층에서는 다른 벽 법칙과 유사하지만 log-law 지역에서는 1/7승 법칙을 적용하여 층류저

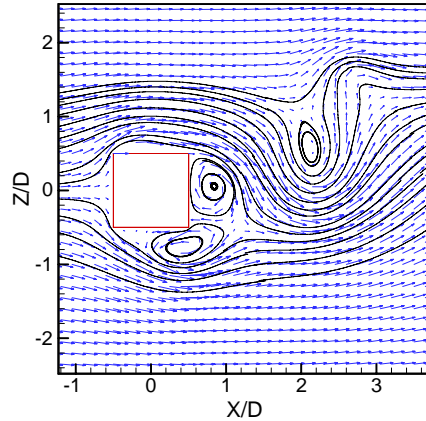


Fig. 2 Phase-averaged velocity vector and streamline of vortex shedding around the simplified pantograph head. (LES-W W)

층과 선형 연계시킨 것이 특징이며, 관계식은 다음과 같다.

$$u_1^+ = \begin{cases} y_1^+ & \text{if } y_1^+ \leq 11.8 \\ 8.3(y^+)^{1/7} & \text{if } y_1^+ > 11.8 \end{cases} \quad (10)$$

여기서 $u_1^+ = u_1/u_\tau$, $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$, $y_1^+ = y_1 u_\tau/\nu$ 이며, u_1 는 벽에서 가장 가까운 격자 지점에서 탄젠트 방향의 속도, y_1 은 이 지점에서 가장 가까운 벽까지의 거리이다

2.4 해석격자

판토틀라프 헤드 주위의 유동 해석을 위하여 직교 좌표계 및 균일 격자(uniform grid) 계를 사용하였으며, 사용된 총 격자수는 약 9백만개이다. 이는 일반 PC에서 처리하기에 쉽지 않은 격자 수 이므로, Linux 기반의 MPI를 이용하여 총 12개의 다중 블록(multi block) 시스템으로 분할하여 병렬 처리 기법[9]을 사용하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 와 흘림(vortex shedding) 유동해석 - 실험 결과와의 비교 분석

판토틀라프 헤드 후류에서 발생하는 와 흘림(vortex shedding) 현상을 분석하기 위하여 Werner-Wengle wall law와 함께 LES 기법을 사용하여 해석하였다. 본 연구 결과의 정확도를 비교 분석하기 위하여 Lyn 등[7]의 실험 결과와 비교하여 분석하였으며, Table 1의 Rodi 등[8]의 해석 결과와도 비교하여 고찰하였다.

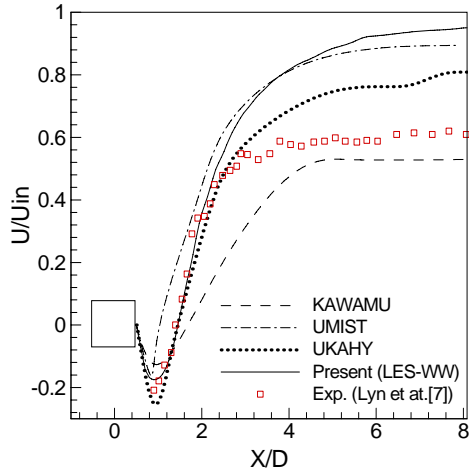


Fig. 3 The time-averaged streamwise mean velocity distributions on the center plane of the pantograph head

Fig. 2는 판토품그래프 헤드 주위의 와 흘림 현상을 해석한 결과로서 헤드 주위의 위상 평균(phased averaged) 속도 벡터 및 유선(stream line)을 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 것처럼 입구에서 다가오는 유동은 헤드와 충돌하면서 헤드 중앙에서 정체점(stagnation point)을 형성하며, 헤드의 양쪽 측면 쪽에서는 유체의 가속 및 유동 박리(flow separation) 현상이 발생한다. 측면에서의 유동 박리 지점은 사각 모서리에서 발생하지만 박리 이후에 와류의 생성 및 소멸로 인한 재유동(re-circulation) 형태는 시간에 따라서 주기적으로 변하는 형태를 갖게 되며, 이를 와 흘림 (vortex shedding) 현상이라고 한다. 일반적으로 본 연구와 같은 경우는 유동의 박리점을 정확히 예측할 수 있지만 물체가 곡선부를 포함하는 경우는 유동의 박리점이 시간에 따라 변하게 되어 유동의 박리점을 정확히 예측하기가 어려우며, 이를 해결하기 위해서는 벽 근처에서 많은 수의 격자가 필요하게 된다.[14]

Fig. 3은 와 흘림 현상(vortex shedding)을 시간 평균(time-averaged)하여 주 유동 방향의 속도를 실험 결과[7] 및 다른 연구자의 결과[8]와 본 연구 결과를 비교 분석한 것이다. 실험결과의 경우 헤드 벽 근처에서의 유동이 계측되지 않아서 해석 결과와의 정확한 비교가 되지 않지만 해석 결과들이 와 흘림 현상을 정성적으로 잘 예측하고 있는 것을 볼 수 있다. 즉 헤드 바로 후류 지역에서 역 방향의 유동이 존재하고 그 이후로는 유속이 회복되는 경향을 보이고 있다. 실험 결과와 정량적으로 잘 일치하는 결과를 보이는 KAWAMU의 경우 Table 1에서 기술하였듯이 벽 경계 조건으로 벽 부착(no-slip) 조건을 사용하였기 때문이다. 다른 해석 결과들은 모두 벽 법칙(wall function)을 사용하고 있어 벽 근처에서의 유동을 계산

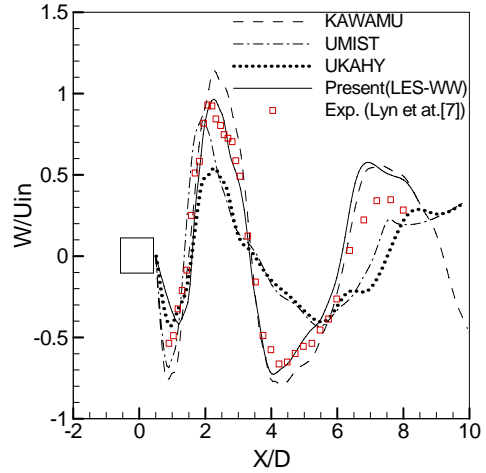


Fig. 4 The phase-averaged vertical velocity distribution(for phase $\Phi = 0$) on the center plane of the pantograph head

하지 않는다. 따라서 이러한 유동 박리 현상이 존재하는 유동 해석의 경우 벽 부착 조건의 중요성을 확인 할 수 있다. 하지만 벽 부착 조건을 사용할 경우 계산 격자 및 계산 시간이 급격히 증가하는 어려움이 존재한다. 또한 본 연구 결과 및 벽 법칙을 사용한 다른 연구자의 결과 사이에 차이가 존재하는 것은 Subgrid Scale(SGS) 모델 사용에 있어서의 차이점 및 헤드 후류 지역에서의 사용된 격자수 및 방법에 있어서 차이가 있기 때문이다. FDS 코드를 사용한 본 연구 결과도 실험 결과를 잘 추종하고 있으며, 다른 LES 해석 결과와 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 이는 벽 법칙이 추가되어 개선된 FDS의 유동 해석 능력이 신뢰할 만한 수준이라는 것을 보여 준다.

Fig. 4는 헤드 후류에서의 종방향 속도(W/Uin)를 위상 평균($\Phi = 0$)한 결과이다. 헤드 바로 뒤 부분에 와류의 존재로 인하여 -Z 방향으로의 속도가 존재하며 하류로 진행하면서 유동의 방향이 순방향으로 변하게 된다. 이는 Fig 6(a)와 일치하는 현상이며, X/D=2 부근에서 종방향으로의 최고 유속이 입구 속도에 근접하는 속도를 보이고 있다. 또한 종방향 유속은 하류로 진행하면서 그 크기가 점점 줄어들고 있는 것을 볼 수 가 있다. FDS를 이용한 본 연구결과는 헤드 바로 후

Table 1 Contributors and methods for simulation [8]

Contributor	Group	Subgrid-Scale (SGS) Model	Wall Boundary Condition
KAWAMU	Science Univ. of Tokyo, Japan	Smagorinsky	No slip
UMIST	UMIST, U.K.	Dynamic	Wall law
UKAHY	Karlsruhe/Inst. for Hydromechanics, Germany	Smagorinsky	Wall law

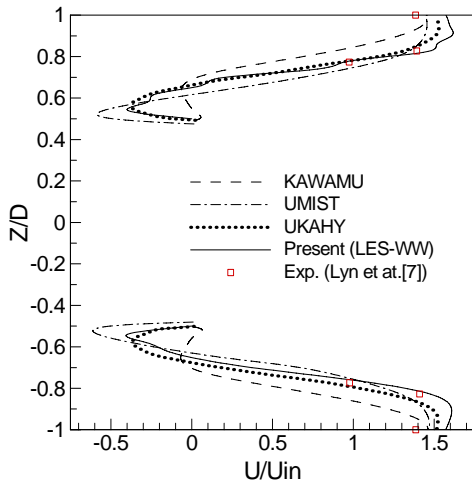


Fig. 5 Close-up of the time-averaged streamwise velocity near the pantograph head

류에 서는 실험 결과와 매우 유사한 결과를 보였으나 하류로 진행할수록 실험 결과에서 벗어나는 거동을 보이고 있다 이

는 헤드 벽 부착(no-slip) 경계조건의 부재 및 벽 근처에서의 격자수의 부족으로 인한 결과라고 판단된다

Fig. 5는 판토품 그래프 헤드 양쪽 측면 벽 근처(near wall)에서의 시간 평균 유동현상을 확대하여 나타낸 것이다. 벽 근처의 매우 근접한 부근에서 실험 결과[7]의 부재로 인하여 자세한 비교가 불가능하지만 벽 근처에서의 유동 박리 현상을 관찰할 수 있다. 벽 부착(no-slip) 경계조건을 사용한 KAWAMU의 결과를 제외하고는 유사한 결과를 보이고 있다. 본 연구와 같이 물체로 접근하는 유동 구조 속에서는 물체 벽 근처에서 층류 유동(laminar flow)으로부터 천이 유동(transition flow)으로 발전하고 다시 난류 유동(turbulent flow)으로 발전하는 구조를 가지고 있다. 천이 유동을 해석하기 위해서는 다수의 격자가 필요하며, KAWAMU의 결과가 wall function을 사용한 시뮬레이션 결과보다 좋지 않은 것은 이러한 천이유동을 해석하기에는 불충분한 격자를 사용하였다는 것을 의미한다. 이는 벽 근처의 유동을 정확히 해석하기 위해서는 매우 많은 수의 격자가 필요하다는 것을 암시한다.

Fig. 6은 와 흘림 현상을 위상 평균하여 순차적으로 나열한 유선 그림이다. Fig. 6(a)은 $\Phi = 0$ 에서의 평균 유선이다.

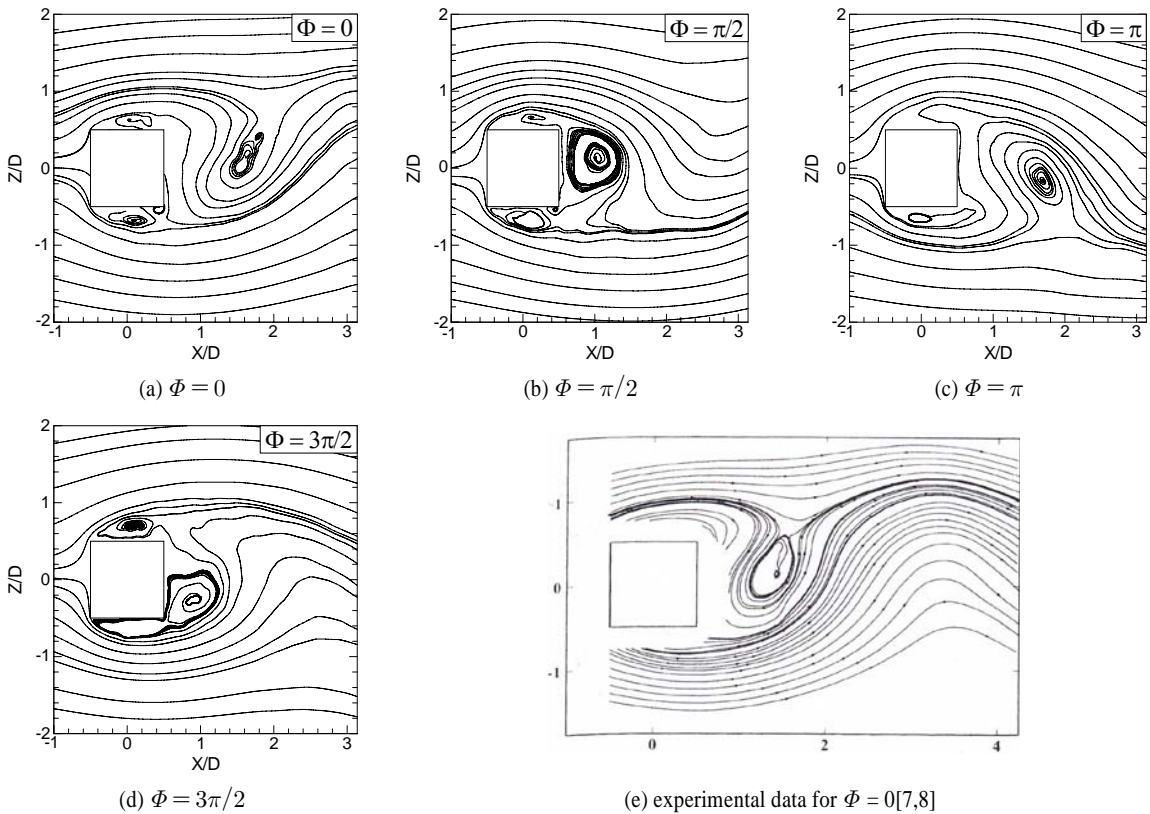


Fig. 6 Phase-averaged streamlines contours at the phase angles at $\Phi = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$

Fig. 6(e)의 실험 결과와 본 연구 결과를 비교하여 보면 매우 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 3에서도 지적하였듯이 헤드 바로 후류 지역에서 음의 방향 유속이 존재하고 $X/D=2$ 부근에서 가장 큰 종방향 속도(W)가 발생한다. Fig. 6(b)은 $\Phi = \pi/2$ 에서의 평균 유선이다. $\Phi = 0$ 에서 발생한 와류가 하류지역으로 이동되고 새로운 와류가 바로 헤드 뒤에서 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(c)은 $\Phi = \pi$ 에서의 평균 유선이다. Fig. 6(a)에서 관찰되었던 와류가 반대방향에서 발생하여 Fig. 6(a)의 거울 이미지(mirror image)를 보는 것과 같다. Fig. 6(d)은 $\Phi = 3\pi/2$ 에서의 평균 유선이며, Fig. 6(b)과 대칭되는 현상을 보여 주고 있다. 이처럼 와 흘림 현상은 헤드 양 측면에서 발생하는 유동 박리가 하류로 이동하면서 시간에 따라 주기적으로 성장 소멸을 질서 정연하게 반복하는 현상이다. 이는 양력과 항력에 직접적으로 영향을 주며, 공력 소음의 원인을 제공하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 철도 차량 관토히라프 펜헤드를 구성하는 장치 중 헤드 스트립을 제외한 크로스 바(cross bar)를 정사각 단면으로 단순 모델화하여 펜헤드 주위에서 발생하는 와 흘림 현상을 수치해석적으로 연구하여 실험 결과[7] 및 타 연구 결과[8]와도 비교하여 분석하였다.

유동 조건 $Re=22,000$ 하에서 와 흘림 현상을 해석하기 위하여 FDS 코드의 LES 기법을 사용하였으며, SGS(subgrid scale) 모델로는 Smagorinsky model($C_s=0.2$)[13,14,15]을 채용하였다. 벽 근처(near wall)에서의 유동해석을 위하여 여러 벽 법칙 중 하나인 Werner-Wengle wall law[14, 16]을 사용하여 유동 변수를 계산하였다. 해석 결과, 주 유동 방향(U) 및 종방향(W) 속도 분포에 있어서 FDS 코드를 사용한 본 연구결과가 실험 결과를 정성적 및 정량적으로 잘 추종하고 있었으며 사용된 벽 법칙으로 인하여 벽 근처에서의 유동 분포도 실험 결과에 근사한 분포를 보이고 있었다. 다른 주요한 연구 결과와의 비교에 있어서 벽 법칙을 사용한 경우는 본 연구 결과와 유사한 경향을 보이고 있는 반면, 벽 부착(no-slip)조건을 사용하고 있는 경우는 좀 더 실험값에 근사한 결과를 보이고 있었다. 또한 본 연구 결과 중 위상 평균한(phase averaged) 주 유동 방향의 유선 분포 해석 결과도 실험 결과와 잘 일치하고 있는 것으로 조사되었다.

본 연구를 통하여 벽 법칙(wall function)을 채용한 FDS의 LES 기법은 공력 해석 능력에 있어서 신뢰할 만한 수준이라고 판단되며, 더욱 향상된 결과를 얻기 위해서는 벽 근처에서의 경계조건 및 격자수 등을 주의 깊게 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 "녹색성장 실현을 위한 철도 건설기술 향상 방안 연구(KN10001)" 과제의 지원에 의하여 수행된 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2008, Rho, J. H., Kwak M. H., Park, H. I., Lee, Y. B., Lee, D. H. and Cho, H. K., "An Experimental Study on the Aerodynamic Characteristics of the Robust Optimized Shape of Pantograph Panhead," *Spring Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway*, pp.2204-2209.
- [2] 2008, Rho, J. H., Ku, Y. C., Yun, S. H., Kwak, M. H., Park, H. I., Kim, K. H. and Lee, D. H., "Study on the Aerodynamic Analysis of the High-Speed EMU," *Spring Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway*, pp.1152-1157.
- [3] 1994, Fox, R. W. and McDonald, A. T., "Introduction to Fluid Mechanics," *Fourth Edition, WILEY*.
- [4] 2009, Kwon, H. B., Cho, Y. H., Lee, K. W. and Kim, K. N., "A Real-scale Wind Tunnel Testing on a Pantograph for High-Speed Train to Assess the Aerodynamic Characteristics," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.12, No.5, pp.732-737.
- [5] 2009, Kim, K. N., Cho, Y. H., Ko, T. H. and Kwon, H. B., "Evaluation of the Aerodynamic Characteristic on the Pantograph Model," *Spring Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway*, pp.1152-1157.
- [6] 1994, Lyn, D.A., and Rodi, W., "The Flapping Shear Layer Formed by Flow Separation from the Forward Corner of a Square Cylinder," *Journal of Fluids Mechanics*, Vol.267, pp.353-376.
- [7] 1995, Lyn, D.A., Einav, S., Rodi, W., and Park, J.-H., "A Laser-Doppler-Velocimetry Study of Ensemble-Averaged Characteristics of the Turbulent Near Wake of a Square Cylinder," *Journal of Fluids Mechanics*, Vol.304, pp.285-319.
- [8] 1997, Rodi, W., Ferziger J. H. and Breuer, M., Pourquie M., "Status of Large Eddy Simulation: Results of a Workshop," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol.119, pp.248-262.
- [9] 2009, Jang, Y.-J., Lee, C.-H., Kim, H.-B., and Jung, W.-S.,

- "The Examination of Accuracy of Fire-Driven Simulation in Tunnel Equipped with Ventilation," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.14, No.3, pp.115-122.
- [10] 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", *Transactions of the KSME (B)*, Vol.33, No.3, pp.156-163.
- [11] 2007, Jang, Y-J and Park, W-H, "The Applicability Analysis of FDS code for Fire-Driven Flow Simulation in Railway Tunnel", *Journal of the korean society for railway*, Vol.10, No.2, pp.224~230.
- [12] 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.
- [13] 2010, McGrattan, K., McDermontt R., Hostikka S. and Floyd J., "Fire Dynamics Simulator(Version 5) User's Guide", *NIST*.
- [14] 2003, Temmerman, L., Leschziner, M.A., Mellon, C.P. and Frohlich, J., "Investigation of wall-function approximation and subgrid-scale models in large eddy simulation of separated flow in a channel with streamwise periodic constrictions", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.24, pp.157-180.
- [15] 2005, Dejoan, A., Jang, Y.J., and Leschziner, M.A., "Comparative LES and Unsteady RANS Computations for a Periodically-Perturbed Separated Flow Over a Backward-Facing Step", *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol.127, p.872-878.
- [16] 1991, Werner, H. and Wengle, H., "Large-eddy simulation of turbulent flow over and around a cube in a plate channel", *8th Symposium on Turbulent Shear Flows.*, pp.155-168.