커버 형상을 고려한 고속전철 팬터그래프 공력특성의 수치해석적 연구

강 형 민,¹ 김 철 완,^{*1} 조 태 환,¹ 김 동 하,¹ 윤 수 환,² 권 혁 빈²

¹한국항공우주연구원, 공력성능팀

²한국철도기술연구원, 공력연구팀

INVESTIGATION FOR THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF HIGH SPEED TRAIN PANTOGRAPH WITH COVER

H.M. Kang,¹ C.W. Kim,^{*1} T.H. Cho,¹ D.H. Kim,¹ S.H. Yoon² and H.B. Kwon²

¹Korea Aerospace Research Institute, Aerodynamics Team

²Korea Railroad Research Institute, Aerodynamics Research Team

The aerodynamic performance of the pantograph on a high speed train was compared for different pantograph covers which are designed to block the aero-acoustic noise from the pantograph. For the study, two types of cover are designed: wedge and cone types. The lift force of pantograph with cover was compared with the force of pantograph only. The comparison clarified that the cone type cover increases the sideslip angle of the flow and decreases the lift force considerably. However, the wedge type cover changes the flow direction upward and increases the lift force of the pan head. This increment of lift force compensates the decrement of lift force caused by the blocking of the flow into the pantograph lower frame due to cover. Therefore, in case of the wedge type cover, the overall lift force changes slightly compared with the cone type cover.

Key Words : 팬터그래프(Pantograph), 팬터그래프 커버 (Pantograph Cover), 압상력 (Lift), 전산유체역학 (CFD)

1. 서 론

전 세계적으로 전력을 이용하는 고속열차는 친환경적이고 효율적인 교통수단으로 인식되고 있으며 활발한 연구가 진행되고 있다. 우리나라에서도 KTX 고속열차의 도입 이후 고속열차의 개발이 활발히 수행되고 있으며, 최근에는 목표 주행속도가 400km/h 이상으로 증속된 차세대 고속열차가 개발되고 있다. 그러나 열차가 고속으로 주행할 경우 이로 인해 열차 자체의 공기역학(이하 공력)적 저항이 급격하게 증대될 뿐만 아니라 열차 교행 시 측풍으로 인해 주행 안정성 저하, 터널 내 주행 시 터널 내의 급격한 압력 변동 및 이로 인한 이명 현상 등의 열차 내 승객의 승차감 저하, 터널 출구에서의

미기압과, 열차풍에 의한 자갈 비산 등 고속 유동 현상으로 인한 다양한 문제들이 발생한다. 특히 공력 소음의 경우 열차 속도의 4-6제곱에 비례하여 증가하는 등 열차의 고속 주행 시에 소음의 대부분을 차지하기 때문에 고속 열차 개발의 성패를 결정짓는 주요한 요소 중 하나이다. 따라서 고속 열차에서의 유동 현상 연구 및 이를 이용한 공력 소음 문제 해결을 위하여 다양한 연구들이 수행되어 왔다[1-6].

이러한 연구의 일환으로 고속열차의 주요한 공력 소음원 중 하나인 팬터그래프 시스템의 소음 저감을 위해 팬터그래프에 대한 연구가 수행되고 있다. 팬터그래프는 전력선으로부터 전력을 공급받는 집전계의 역할을 수행하기 위해 지붕 위에 돌출되어 있기 때문에 외부의 고속 유동에 그대로 노출되어 심각한 공력소음을 야기한다. 따라서 팬터그래프 주변에 Fig. 1과 같은 형태의 팬터그래프 커버를 설치함으로써, 팬터그래프로부터 주변으로 전파되는 소음을 차폐하여 소음 수준을 낮출 수 있다. 그러나 팬터그래프 커버는 팬터그래프로 유입되는 유동을 변화시킬 수 있기 때문에 기존의 팬터그래프가 가지고 있던 압상력 특성이 바뀔 수 있다. 이 때 팬터그래프

Received: November 28, 2011, Revised: July 31, 2012,

Accepted: August 1, 2012.

* Corresponding author, E-mail: cwkim@kari.re.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.3.018

© KSCFE 2012

Fig. 1 Pantograph system of a high speed train (Shinkansen Series 500)

프의 압상력이 과도하게 증가할 경우 전력선이 심각하게 마모되어 유지/보수의 문제가 발생할 수 있으며, 과도하게 감소할 경우 팬헤드와 전력선과의 접촉 불량으로 인한 Arching 소음으로 인해 오히려 더욱 큰 소음 문제를 야기할 수 있다.

팬터그래프 커버가 기존 팬터그래프의 압상력에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 팬터그래프 및 팬터그래프 커버 주위의 유동장에 대해 다양한 실험적/수치적 연구가 뒷받침되어야 한다. 이를 위해 차세대고속철도 과제의 일환으로 유진기 공에서는 일본철도기술연구소 (이하 RTRI) 풍동을 이용하여 팬터그래프가 갖는 압상력 및 공력 소음에 대하여 풍동실험을 진행하였다[4]. 또한 팬터그래프 주위의 유동장에 대한 수치해석을 통하여 팬터그래프 자체의 압상력에 대해 계산하거나 다양한 팬터그래프 커버 형상을 고려한 풍동 실험을 수행하는 등 팬터그래프에 관한 기초연구들을 수행하였다[5-6].

본 연구에서는 팬터그래프 커버가 팬터그래프 압상력에 미치는 영향을 분석하기 위해 팬터그래프 및 팬터그래프 커버 주위 유동장에 대해 FLUENT를 이용한 전산해석(CFD)을 수행하였다. 이를 위해 팬터그래프 커버 형상의 경우 기존의 풍동 실험에서 수행하였던 팬터그래프 커버 관련 풍동 실험을 참조하여 썰기 형태 및 뿔 형태의 서로 다른 2가지 형태의 팬터그래프 커버 형상을 선정하였다[6]. 그리고 해석 기법의 신뢰성 검증을 위해 RTRI 풍동 시험에서 사용하였던 팬터그래프 모델을 이용하여 압상력을 계산하고 이를 풍동 실험 결과와 비교하였다. 이렇게 검증된 기법을 바탕으로 하여 팬터그래프 및 팬터그래프 커버 등의 팬터그래프 시스템에 대해 CFD를 수행하여 커버 형상에 따른 팬터그래프의 압상력 변화를 분석하였다. 이를 통하여 팬터그래프의 소음 저감을 위한 팬터그래프 커버 설계의 기초 자료로 활용하고자 하였다.

2. 격자 구성 및 해석 조건 설정

격자 생성을 위해 본 연구에서는 RTRI 실험에서 사용되었

(a) Overall pantograph shape

(b) Pan head section

Fig. 2 Original shape of a pantograph

던 실제 팬터그래프의 형상 파일을 이용하여 3차원 해석 격자를 생성하였다. 또한 팬터그래프 커버의 경우 썰기 형태 및 뿔 형태의 2가지 팬터그래프 커버 형상을 선정하였다. 따라서 본 논문에서는 총 3 종류의 3차원 격자를 생성하였다. 공력해석을 위해서는 상용 소프트웨어인 FLUENT를 이용하여 비압축성 유동에 대하여 2방정식 난류 모델인 $k-\omega$ SST 모델을 사용하여 정상 상태의 유동 해석을 수행하였다[7, 8]. 이후 각각의 커버 형태가 팬터그래프 압상력에 어떤 영향을 미치는지 비교하였다. 각각의 세부적인 내용은 다음과 같다.

2.1 팬터그래프/팬터그래프 커버 해석 격자 생성

본 연구에서는 실험 결과와의 비교 검토를 위해 Fig. 2와 같이 소음 풍동 실험에서 사용하였던 실제 팬터그래프의 형상으로부터 해석용 격자를 생성하였다[4]. 실제 팬터그래프 형상의 경우 하부 구조물 및 각각의 프레임(Frame), 팬 헤드(Pan head), 익형(Airfoil) 등 굉장히 복잡한 구조이다. 따라서 원활한 격자 생성을 위해서는 실제 형상을 크게 왜곡시키지 않는 선에서 적절한 모델링이 필요하다. 본 연구에서는 상용 프로그램인 GAMBIT을 이용하여 해석 형상에 대한 모델링을 수행하였으며, 이를 통하여 Fig. 3과 같은 공력 해석용 형상을 만들었다. 이 때 해석의 효율성을 위해 가운데를 대칭면으로 하여 팬터그래프의 절반만을 이용하여 팬터그래프 형상을 구현하였다. 이 때 Balance rod의 경우 비대칭이지만 그 직경이 다른 프레임에 비해 비교적 작기 때문에 한 쪽 Balance rod의 압상력을 전체 결과에서 보정하는 방식을 통하여 팬터그래프

Fig. 3 Aerodynamic model of pantograph

Fig. 4 Shapes of pantograph covers

의 압상력 계산을 수행하였다.

팬터그래프 커버 형상은 기존에 수행되었던 풍동 실험을 참조하여 썰기 형태 (Wedge type)와 뿔 형태 (Cone type)의 총 2종의 팬터그래프 커버 형상을 선정하였다[6]. 각각의 팬터그래프 커버 형상을 Fig. 4에 도시하였다. 두 개의 커버 모두 앞 뒤 길이는 약 13m, 폭은 약 2m 정도이며, 높이의 경우 썰기 형태 커버의 경우 약 0.76m, 뿔 형태 커버의 경우 가운데 높이가 약 0.72m, 옆면 높이는 약 0.28m이다.

Fig. 5 Assembly of internal and external domain

Fig. 6 Overall process of 3 dimensional grid construction

이러한 팬터그래프 및 팬터그래프 커버 형상을 이용하여 본 연구에서는 3차원 해석 격자를 생성하였다. 이 때 계산의 정확도 향상을 위해서는 팬터그래프 및 팬터그래프 커버 주변에 격자가 조밀하게 분포해야 한다. 효율적인 격자 생성을 위해 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 내/외부 영역을 구분하였다 [5]. 이후 내부의 팬터그래프 형상 주위에는 사면체 격자를 이용하여 격자를 조밀하게 분포시켰으며, 외부 영역은 직육면체 격자를 이용하여 3차원 격자를 생성하였다. 전체적인 격자 생성 과정을 Fig. 6에 도식화하였다. 그 결과 팬터그래프 해석의 경우에는 약 1650만 개, 썰기 형태의 커버가 추가된 모델의 경우에는 약 2180만 개, 뿔 형태의 커버가 추가된 경우에는 약 2120만 개의 격자를 이용하였다. 이 때 벽면 근처에서의 y^+ 값은 대략적으로 2-3 내에 분포함을 확인하였다.

2.2 해석 및 경계 조건 설정

본 연구에서는 상용 코드인 FLUENT를 이용하여 3차원 비압축성 유동에 대한 해석을 수행하였다. 이 때 난류 계산을 위해 본 연구에서는 2방정식의 $k-\omega$ SST 난류 모델을 이용

Fig. 7 Flow directions

Fig. 8 Lift/Drag coefficient history (Pantograph without cover, 400km/h, Fore direction)

하였다[7, 8]. $k-\omega$ SST 모델은 각 영역별로 적절한 난류 모델이 사용될 수 있도록 결합 함수 값의 조절을 통하여 벽 (wall) 근처에서 $k-\omega$ 모델을, 외부 영역 (Far field)에서는 $k-\epsilon$ 을 모델을 쓸 수 있도록 두 개의 모델을 결합한 형태이다. 따라서 다양한 클래스의 유동에 대해 좀 더 신뢰성 있는 유동 해석이 가능하다. 또한 2방정식으로 난류를 모델링하여 계산하기 때문에 상대적으로 효율적인 계산을 수행할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 2방정식의 $k-\omega$ SST 모델을 이용하여 난류 계산을 수행하였다.

경계 조건의 경우에는 유동의 유입 (Inlet) 부분은 Velocity inlet 조건으로 설정하였다. 유동의 출구 (Outlet) 부분은 Pressure outlet 조건으로 선정하였으며, 나머지 영역은 대칭 (Symmetry) 조건으로 하였다. 또한 Fig. 7과 같이 정방향 (Fore direction)과 역방향 (Reverse direction)의 2가지 방향에 대해 유동 해석을 수행하였다. 또한 유속의 경우 해석 기법 검증에 위한 팬터그래프 주위 유동장 해석의 경우 250km/h와 400km/h의 2가지 속도에서 계산을 수행하였으며, 팬터그래프 커버를 포함한 팬터그래프 시스템 주위 유동장 해석의 경우 400km/h의 속도에서 계산을 수행하였다.

(a) 250km/h

(b) 400km/h

Fig. 9 Pressure contour around the pantograph

3. 해석 결과

격자계 및 해석 조건 설정 등의 적합성을 검증하기 위해 본 연구에서는 우선 250km/h 및 400km/h의 속도에서 팬터그래프 주위 유동에 대해 해석을 수행하였다. 그리고 해석 결과에서 팬터그래프의 중요 성능 지표인 압압력을 계산하여 이를 RTRI 실험 결과와 비교하였다. 해석을 위해 2.67GHz 쿼드 코어 CPU 17개를 이용하여 병렬 계산을 수행하였다. 또한 보다 안정적인 계산을 위해 1차 정확도의 수치 모델을 이용하여 초기 계산을 수행하여 유동을 계산한 이후 다시 2차 정확도의 수치 모델을 이용하여 반복 계산을 수행하였다.

일례로 정방향 400km/h의 조건에서 팬터그래프의 유동 해석 시에 약 1,650만 개의 격자를 이용하여 12,000번의 반복 계산을 수행하였을 때의 Residual 및 양력/항력 계수의 변화 양상을 Fig. 8에 나타내었다. 이 경우 총 계산 시간은 약 28시간 11분이 소요되었다. Residual의 경우 수렴성이 미진하지만 Fig. 8과 같이 양력 계수 및 항력 계수 등의 공력 계수들은 충분히 수렴하였음을 알 수 있다. Residual의 수렴성 개선을 위해서는 격자 질의 향상 작업 등이 더 필요할 것으로 생각되나, 공력 계수를 활용하여 압압력을 계산하는 면에 있어서는 큰 문제가 없을 것으로 판단하였다. 따라서 본 논문에서는 계산 효율 등을 고려하여 Residual의 경우 10^{-3} 정도까지 수렴시켰으며, 공력계수들은 충분히 수렴될 때까지 반복 계산을 수행하였다.

(a) Pantograph

(b) Pantograph + Wedge type cover

(c) Pantograph + Cone type cover

Fig. 10 Pressure contours, Fore direction

속도 250km/h 및 400km/h에서의 정방향 유동에 대하여 압력 분포를 Fig. 9에 도시하였다. 정체압력 영역 및 유동의 가속으로 인한 저압 영역 등이 비교적 정확하게 계산되었음을 확인할 수 있다.

보다 정량적인 비교를 위해 각각의 유동 방향 및 속도에서 팬터그래프가 받는 압상력을 계산하여 Table 1에 정리하였다. 이 때 해석의 경우 중양을 대칭면으로 하여 계산을 수행하였기 때문에 압상력 계산 시에 Balance rod의 압상력이 2배로 계산된다. 따라서 압상력 계산 시에는 한 쪽의 Balance rod가 받는 압상력을 전체에서 빼 주는 방식으로 압상력을 보정하였다.

Table 1 Comparison of lift force

Speed	Flow direction	Experiment (N)	Analysis (N)
250km/h	Fore	96.7	97.2
	Reverse	38.1	45.2
400km/h	Fore	253.6	250.8
	Reverse	130.3	120.0

(a) Pantograph

(b) Pantograph + Wedge type cover

(c) Pantograph + Cone type cover

Fig. 11. Pressure contours, Reverse direction

였다. 이러한 보정 결과 정방향 유동의 경우에는 실험값과 계산값과의 압상력 차이가 4N 이하로 실험값과 매우 유사함을 확인하였다. 역방향 유동의 경우에는 그 차이가 정방향 유동에 비해서는 8-10N 정도로 다소 큰데 이는 대칭면을 이용한 계산으로 인해 역방향 유동에서 Balance rod가 상부 프레임에 미치는 영향이 다소 과도하게 계산되었기 때문으로 생각된다. 그러나 전체적으로는 압상력 차이가 10N 이하로 비교적 정확하게 계산되었음을 확인할 수 있다.

검증된 해석 기법 및 격자계를 바탕으로 하여 400km/h의 속도에서 팬터그래프 및 팬터그래프+췌기 형태 커버, 팬터그래프+뿔 형태 커버 모델에 대해 정방향 및 역방향 유동에 대해 해석을 수행하였으며, 압력 분포를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 팬터그래프 커버를 고려한 유동 해석의 경우 정방향 유동에서 (+) 압상력을 발생시키는 Trust rod 및 하부 프레임(Lower frame)이 팬터그래프 커버 속 유동에 잠겨 있게 된다. 따라서 팬터그래프만의 유동에 비해 Trust rod 및 하부 프

(a) Pressure contour

(b) Velocity vector

Fig. 12 Lower part of the pantograph, Reverse direction

래임 전면부에서의 압력 하강으로 인해 팬터그래프만의 유동에 비해 압상력이 작아짐을 알 수 있다.

역방향 유동의 경우에는 Trust rod나 하부 프레임에서 (-) 압상력이 발생하여 팬터그래프가 받는 압상력을 감소시킨다. 그러나 팬터그래프만의 유동의 경우에는 Fig. 12와 같이 하부의 복잡한 구조물에서 먼저 유동이 박리되면서 하부 프레임에 빠른 속도로 유동이 유입된다. 이로 인해 전면부의 압력이 하강하면서 역방향 유동으로 인한 하부 프레임에서의 압상력 감소분을 많이 상쇄된다. 따라서 역방향에서도 커버 형상을 고려한 경우 팬터그래프의 압상력이 기존의 압상력보다 작아진다.

Fig. 13에는 각각의 팬터그래프 커버에 의해 유동의 흐름이 어떻게 변하는지에 확인하기 위해 Path line을 도시하였다. 썰기 형태 커버의 경우 Fig. 13 (b)와 같이 커버 형상을 따라 Path line이 팬 헤드 쪽으로 상승하고 있다. 이로 인해 팬터그래프 쪽으로 유입되는 유동의 반음각이 증가로 인한 압상력 상승으로 Trust rod 및 하부 프레임에서의 압상력 감소분이 많이 상쇄됨을 알 수 있다. 이에 반해 뿔 형태 커버의 경우 Fig. 13(c)에 도시된 것과 같이 썰기 형태 커버에 비해 팬터그래프로 유입되는 유동의 반음각 증가는 미미하다. 따라서 썰기 형태 커버에 비해 기존 팬터그래프의 압상력이 많이 낮아짐을 예측할 수 있다. 이러한 해석 결과는 썰기 형태 커버의 경우 압상력을 어느 정도 유지하는 데 반해 뿔 형태 커버의

(a) Pantograph

(b) Pantograph + Wedge type cover

(c) Pantograph + Cone type cover

Fig. 13 Path lines of each model

경우 압상력이 많이 낮아짐을 예측한 이전의 실험 결과와도 정성적으로 상당히 일치함을 확인할 수 있다[6].

각각의 커버가 팬터그래프 압상력에 미치는 영향을 정량적

Table 2 Comparison of lift force

	Flow direction	Analysis (N)	Force Ratio (%)
Pantograph	Fore	250.8	100.0
Pantograph + Wedge type Cover	Fore	166.8	66.5
Pantograph + Cone type Cover	Fore	60.8	24.2
Pantograph	Reverse	120.0	100.0
Pantograph + Wedge type Cover	Reverse	96.8	80.7
Pantograph + Cone type Cover	Reverse	65.9	54.9

으로 비교하기 위해 각각의 해석 조건에 대해 400km/h에서의 정방향 및 역방향에서의 압상력을 Table 2에 정리하였다. 표에서 알 수 있듯이 정방향의 경우 켄기 형태 커버 모델에서 팬터그래프의 압상력이 약 67% 유지되는 데 반해 뿔 형태 커버의 경우 압상력이 원래의 팬터그래프 압상력의 약 24% 정도로 낮아진다. 역방향 유동 시에는 켄기 형태 커버에서 원래 압상력의 약 81%, 뿔 형태 커버에서 약 55% 정도가 유지됨을 알 수 있다. 따라서 뿔 형태의 커버 모델은 팬터그래프의 압상력을 많이 낮추는 데 반해 켄기 형태의 커버 모델은 원래의 팬터그래프가 가지고 있던 압상력을 어느 정도 유지시킴을 확인하였다.

4. 결 론

고속열차 팬터그래프 시스템의 공력 소음 저감을 위한 기초연구로서, 팬터그래프 커버가 팬터그래프의 공력 특성에 미치는 영향을 분석하고자 팬터그래프 및 팬터그래프 커버에 대해 공력해석을 수행하였다. 우선 해석 기법 및 격자계의 적합성을 파악코자 시속 250km/h 및 400km/h에서의 팬터그래프의 중요한 성능지표 중 하나인 압상력을 계산하여 RTRI 풍동 실험 결과와 비교하였다. 그 결과 실험값과의 오차가 10N 이하로 비교적 정확하게 유동 해석이 수행되었음을 확인하였다. 이를 토대로 켄기 형태 및 뿔 형태의 팬터그래프 커버 모델이 팬터그래프 압상력에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다. 그 결과 켄기 형태의 커버 모델의 경우 커버 형상을 따라 유동이 흐르면서 받음각이 상승하여 기존 팬터그래프가 가지고 있던 압상력이 정방향의 경우 67%, 역방향의 경우 81% 정도로 기존 팬터그래프의 압상력이 잘 유지됨을 확인하였다. 이에 비해 뿔 형태 커버 모델의 경우 팬터그래프로 유입되는 유동의 받음각이 상승하지 않고 유동이 좌우로 분산되어 압상력이 정방향의 경우 24%, 역방향은 55% 정도만이 유지되어 기존 팬터그래프의 압상력이 많이 낮아짐을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 차세대 고속철도 기술개발사업 “분산형 고속철도 시스템 엔지니어링 기술개발” 과제의 지원을 받고 있음을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] 2005, Lee, H. and Moon D., "Next Generation of Korea Train Express (KTX): Prospect and Strategies," *Proc. of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.3, pp.255-262.
- [2] 2001, Schetz, J. A., "Aerodynamics of high-speed trains," *Annual meeting. Rev. Fluid Mech.*, Vol.33, pp.371-414.
- [3] 2004, Ikeda, M. and Takaishi T., "Perforated Pantograph Horn Aeolian Tone Suppression Mechanism," *QR of RTRI*, Vol.45(3), pp.169-174.
- [4] 2010, 東洋轉機製造株式會社 委託 バソタグラフの風洞試験 報告書.
- [5] 2011, Kang, H. et al., "The Aerodynamic Analysis of Pantograph of the Next Generation High Speed Train," *Korean Society for Computational Fluid Engineering Conference*, 5.26-27, Jeju, pp. 362-367.
- [6] 2011, Lee, Y. et al., "Experimental Studies on Improvement of Aerodynamic Performance of Pantograph System for HEMU-400X," *The Korean Society for Railway*, 5.26-28, KangWon-Do, pp.1-6.
- [7] 1994, Menter, F.R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol.32(8), pp.1598-1605.
- [8] ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, pp. 4.61-4.65.