

차세대 고속전철 팬터그래프 팬 헤드의 압상력 변화 해석

강형민* · 권혁빈**†

Analysis of Change of Contact Force in the Pantograph Pan Head of Next Generation High Speed Train

Hyungmin Kang*, Hyeok-bin Kwon**†

Key Words : Contact Force(압상력), CFD(전산유동해석), Pantograph(팬터그래프), Pan Head(팬 헤드), Unsteady Flow Simulation(비정상유동 해석)

ABSTRACT

In order to investigate the change of contact force of pantograph pan head due to the change of aerodynamic force, three dimensional flow around the pan head were calculated. For this, the aerodynamic modeling of pan head of CX pantograph was performed and the standard deviation of the contact force of the simulation results were compared with those of the experimental results of wind tunnel tests. From the comparison, it was confirmed that the current grid system and the numerical methodologies can be utilized to calculate the aerodynamic characteristics of the pantograph pan head. By using these grid system and the methodologies, the standard deviations of the contact force of pan head were calculated with velocities as 200, 250, 300, 350, and 400 km/h. The maximum standard deviation of the aerodynamic contact force of pan head was 92 N at 400 km/h and statistical minimum contact force was more than 0 N. Therefore, it was confirmed that and the pan head of CX pantograph was statistically contacted with the catenary system with the train speed of 350 km/h though the aerodynamic contact force was changed.

1. 서 론

전 세계적으로 사회적, 경제적 활동이 활발해지면서 인적/물적 자원의 수송량은 점차 증대되고 있다. 그러나 온실가스 증대 및 자원고갈 문제 등으로 인해 기존의 도로 기반 교통수단은 한계에 부딪히고 있으며 차세대 친환경 에너지 기반 교통수단에 대한 필요성이 꾸준히 제기되고 있다. 고속열차는 이러한 수요를 충족시킬 수 있는 친환경적이고 효율적인 교통수단으로 인식되고 있으며 최근에는 목표 주행 속도가 400 km/h 이상으로 증가된 차세대고속열차가 개발되고 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 그러나 열차가 고속으로 주행하게 될 경우 저속에서의 경우와 달리 주행저항의 급속한 증가, 공력소음, 터널 출구에서의 충격성 소음, 열차 교행 시 측풍으로 인한 주행

안정성 저하, 열차풍에 의한 자갈 비산, 터널 진출입 시 승객의 이명감 문제 등 다양한 공기역학적 문제가 유발되고 있으며 이를 해결하기 위해 다양한 연구들이 진행되어 왔다.⁽¹⁻⁷⁾ 특히 전력선으로부터 전동차에 전력을 공급하는 핵심장치인 팬터그래프의 경우 그 위치적인 한계로 인해 외부 고속 유동에 그대로 노출되어 있기 때문에 고속열차의 공기저항과 공력소음 증가의 주요 원인으로 인식되고 있으며 이에 관한 활발한 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁻⁷⁾

이러한 연구의 일환으로 팬터그래프 주위의 유동장에 대한 수치해석을 통하여 팬터그래프의 압상력을 계산하거나 다양한 팬터그래프 커버 형상을 고려하여 팬터그래프 및 팬터그래프 커버 주변 유동장에 대한 풍동 실험 및 전산해석을 수행하는 등 팬터그래프에 관한 기초연구들이 수행되었

* 동양미래대학교 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University)

** 한국교통대학원 교통시스템공학과(Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation)

† 교신저자, E-mail : hbkwon@ut.ac.kr

다.⁽¹⁻³⁾ 오혁근 등⁽⁵⁾은 차세대 고속열차(HEMU-430X)의 동적 접촉력 측정을 위한 주행시험을 수행하였으며 이를 통해 집전성능에 대한 분석을 수행하였다. 이상아 등⁽⁶⁾은 더블암 팬터그래프의 부재별 공력소음 특성에 대한 연구를 수행하였다. 또한 최근에는 고속열차용 저소음/저저항 팬터그래프 공력설계 기술 및 플스케일 팬터그래프 형상 개발 과정을 통하여 팬터그래프와 관련한 다양한 풍동시험/전산해석이 수행되었다.⁽⁸⁾

팬터그래프는 안정적인 전력 전달이 핵심 기능이기 때문에 전력선의 고저 변화에 대하여 충분한 추종성이 확보되어야 하며 따라서 일정 수준의 압상력이 요구된다. 즉 팬 헤드(Pan head)의 압상력 증가로 인한 전선의 과도한 마모는 억제되어야 하면서도, 집전을 위해 팬 헤드와 전력선 간의 이격 또한 억제되어야 한다. 그러나 열차의 고속 주행 시에 공기력의 진동으로 인해 팬 헤드의 압상력이 큰 폭으로 변화할 수 있으며 이는 압상력의 과도한 증가로 인한 전력선의 유지, 보수 문제 및 팬터그래프와 전력선 간의 이선 현상으로 인한 아크 소음 등 다양한 문제점을 야기한다. 따라서 압상력의 과도한 변동을 억제하기 위해 유럽 고속선의 경우 EN 50119 규정에서 200 km/h 이상 속도의 경우 정적 접촉력과 공력에 의한 접촉력 합이 평균값 F_{mean} 및 변동값의 표준편차 σ 에 대해 $(F_{mean} - 3\sigma)$ 를 0 N 이상으로 제한하고 있다.⁽⁸⁻⁹⁾

이 중 공기력에 따른 팬터그래프 팬 헤드의 압상력 변동을 분석하기 위해서는 실험적/해석적 방법 및 실제 주행 시험 등을 통한 팬터그래프 팬 헤드 주변의 유동장 분석이 요구된다. 그러나 실제 주행 시험의 경우 외부 환경 조건을 통제하는 면에서 어려움이 많이 있으며 풍동시험의 경우 고속유동 조건을 재현하는 데에 많은 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 공기력에 따른 팬터그래프 팬 헤드의 압상력 변동을 분석하기 위해 FLUENT를 이용한 전산유체해석(이하 CFD)을 수행하였다. 이를 위해 KTX-산천에 실제 탑재되어 사용되고 있는 프랑스 페블리사의 CX 팬터그래프의 팬 헤드 형상을 이용하여 해석 격자 생성을 수행하였다. 격자 및 해석 기법의 신뢰성 검증은 위해서는 CFD를 통해 얻어진 CX 팬터그래프 팬 헤드 압상력의 공기역학적 변동 결과를 한국항공우주연구원에서 수행하였던 풍동시험 결과와 비교하였다.⁽⁸⁾ 이렇게 검증된 기법을 바탕으로 하여 실제 주행 속도에서 공기력에 의한 팬터그래프 팬 헤드의 압상력 변동을 분석하였다. 이러한 분석 결과를 팬터그래프의 공기역학적 성능 향상을 위한 팬터그래프 팬 헤드 형상 설계의 기초 자료로 활용하고자 하였다.

2. 공기력 변동에 따른 팬터그래프 집전 성능

팬터그래프가 가선과의 접촉에 의해 발생하는 전체 접촉력 F_c 는 식 (1)과 같이 정적 압상력 F_s 와 공기력에 의해 팬터

그래프에 작용하는 압상력 F_a 및 가속도에 의한 관성력 F_i 로 구성된다.⁽⁵⁾

$$F_c = F_s + F_a + F_i. \quad (1)$$

식 (1)에서 F_a 는 팬터그래프 전체에 작용하는 공기력으로 팬 헤드에 걸리는 공력 F_{sp} 와 그 이외의 공력 F_{nsp} 로 나눌 수 있다. 따라서 식 (1)은 식 (2)와 같이 변형이 가능하다.

$$F_c = F_s + F_a + F_i = F_s + F_{sp} + F_{nsp} + F_i. \quad (2)$$

식 (2)에서 Suspension의 Spring Force F_{sus} 는 F_s 와 F_{nsp} 의 합과 같으므로 전체 접촉력 F_c 및 최종적인 공력 F_{sp} 의 식은 다음의 식 (3) 및 (4)와 같이 주어진다.

$$F_c = F_{sus} + F_{sp} + F_i. \quad (3)$$

$$F_{sp} = F_c - F_{sus} - F_i. \quad (4)$$

이 때 F_{sus} 의 경우 집전판 하부에 설치된 하중 센서의 작용력으로 구하며 F_i 의 경우 가속도계를 이용하여 측정된 관성력으로 구한다. 공력 F_{sp} 의 경우 별도의 공력시험 또는 전산해석을 통하여 얻게 된다. 그러나 F_{sp} 는 팬 헤드의 형상에 따른 비정상 유동으로 인해 크게 변동할 가능성이 있으며 다양한 형상에 대해 실제 주행 속도에서 변동값을 측정하는 데는 많은 비용이 발생한다. 따라서 팬터그래프의 집전 성능 향상을 위해서는 F_{sp} 변동의 표준편차 σ 를 분석하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 이러한 팬터그래프 팬 헤드의 비정상 유동 해석을 통하여 시간에 따른 압상력의 변동을 계산하고 이를 토대로 속도에 따른 σ 의 계산을 수행하였다.

3. 격자 구성 및 해석 조건 설정

3.1 격자 구성

격자 생성을 위해 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 프랑스 페블리사의 CX 팬터그래프의 형상을 이용하여 3차원 해석 격자를 생성하였다. 실제 팬터그래프 형상은 각각의 상하부 프레임(Frame) 및 팬 헤드 등이 기구학적으로 복잡하게 연결되어 있다. 따라서 원활한 격자 생성을 위해서는 실제 형상을 크게 왜곡시키지 않는 선에서 적절한 모델링이 필요하다.

본 연구의 주 목적은 공기 유동에 의한 팬터그래프 팬 헤드의 압상력 변동을 모사하는 것이기 때문에 하부 구조물로 인한 공기력 변동이 팬 헤드의 유동장에 미치는 영향은 팬 헤드 자체에서 발생하는 공기력 변동에 비해 상대적으로 작다고 가정한다. 따라서 Fig. 2와 같이 전체 CX 팬터그래프 중 팬 헤드만을 공기역학적으로 모델링하였다. 이 때 해석의

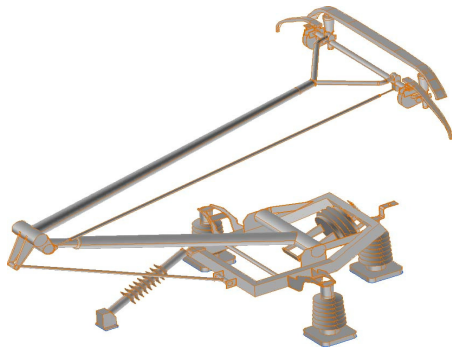


Fig. 1 CX pantograph

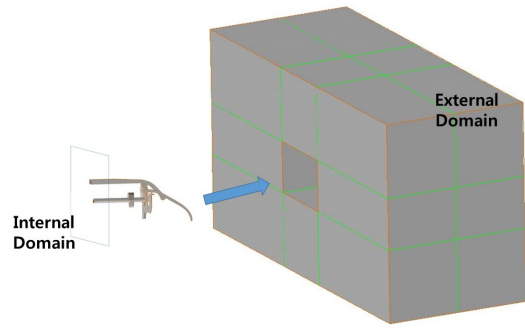


Fig. 3 Assembly of internal and external domain

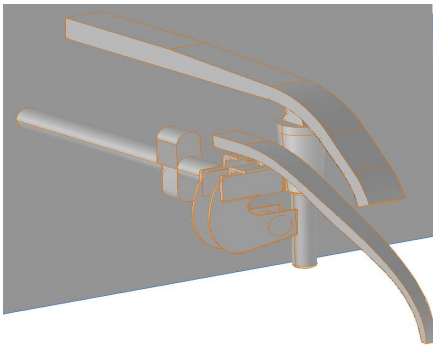


Fig. 2 Pan head of CX pantograph

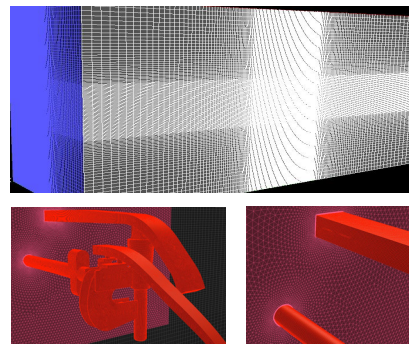


Fig. 4 Computational domain and grid for pantograph

효율성을 위해 가운데를 대칭면으로 하여 전체 팬 헤드 형상의 절반만을 이용하여 모델링을 수행하였다.

이렇게 공기역학적으로 모델링된 팬터그래프 팬 헤드 형상을 이용하여 본 연구에서는 3차원 해석 격자를 생성하였다. 이 때 계산의 정확도 향상을 위해서는 팬 헤드 주변에 격자가 조밀하게 분포해야 한다. 또한 팬 헤드에서 발생하는 유동장 변동이 소산되지 않고 전파되기 위해서는 정렬격자가 유리하다. 따라서 효율적인 격자 생성을 위해 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 계산 영역을 내/외부로 분리하였다.⁽³⁾ 이 때 내/외부 영역의 경계면은 사각 격자를 이용하여 격자가 Conformal하게 구성되도록 하였다. 또한 팬터그래프 팬 헤드 부분은 Fig. 4와 같이 삼각 격자를 이용하여 표면을 구성하였으며, 경계층의 경우 첫 째 격자까지의 거리는 0.02 mm로 하여 25층의 경계층을 구성하였다. 이후 내부의 팬터그래프 형상 주위에는 사면체 격자를 이용하여 격자를 조밀하게 분포시켰으며, 외부 영역은 직육면체 격자를 이용하여 3차원 격자를 생성하였다. 그 결과 전체 격자수는 대략 1500만 개의 비정렬 격자로 구성되었으며 팬 헤드 근처의 y^+ 값은 시속 400 km/에서도 대략 10 이내에 분포함을 확인하였다.

3.2 해석 기법 및 경계 조건 설정

본 연구에서는 상용 코드인 FLUENT를 이용하여 3차원 비압축성 비정상 유동에 대한 해석을 수행하였다. 이 때 난

류 계산을 위해 본 연구에서는 Large Eddy Simulation (LES) 난류 모델을 이용하였다.⁽⁶⁾ LES 난류모델은 큰 스케일의 와류에 대해서는 직접 계산을 하고, 작은 스케일의 와류에 대해서는 난류 점성 모델을 사용하여 계산을 수행하여 박리 및 와류 예측에 뛰어난 것으로 알려져 있다. 따라서 공기력 변동에 의한 압상력 변동을 계산하는 본 논문의 목적에 부합한다. 본 논문에서는 작은 스케일의 난류점성 계산을 위해서 Smagorinsky-Lilly 모델을 적용하였으며 식 (5)와 같이 주어진다.⁽¹⁰⁾

$$\begin{aligned} \mu_t &= \rho L_s^2 |\vec{S}| \\ L_s &= \min(\kappa d, C_s V^{-\frac{1}{3}}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서 L_s , κ , d , C_s , V 는 각각 혼합 길이, von Karman 상수, 가장 가까운 벽면거리, Smagorinsky 상수, 그리고 격자 체적을 나타낸다. Smagorinsky 상수는 광범위한 유동장 해석에서도 사용 가능하도록 Lilly가 제안한 0.1을 적용하였다.

비정상유동 해석을 위해서는 우선 $k-w$ SST 난류 모델을 이용하여 2,000 번의 반복 계산을 통하여 정상유동 해석 해를 구하였다. 그리고 이 해석 결과를 초기 조건으로 하여 LES 난류 모델로 시간 간격을 0.0001s로 하여 Dual time stepping 방법을 이용한 비정상해석을 수행하였다.⁽¹¹⁾ 이 때 Pseudo iteration은 20번으로 설정하여 0.1s의 시간 전진을

Table 1 Velocities of each flow case

Verification (km/h)		Estimation (km/h)	
Start	36	Case 1	200
Case 1	72	Case 2	250
Case 2	126	Case 3	300
Case 3	144	Case 4	350
Case 4	162	Case 5	400

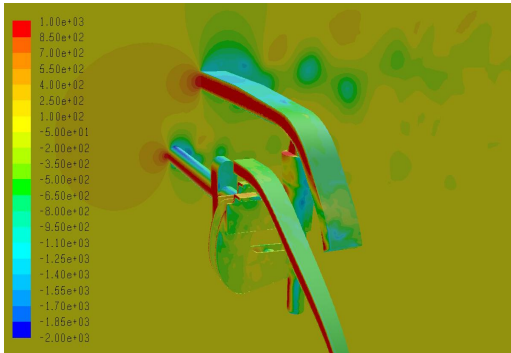


Fig. 5 Pressure contour (144 km/h)

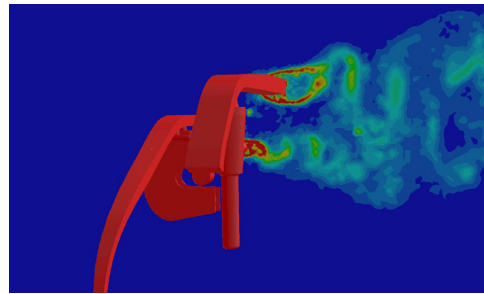
수행하였다. 이후 다시 0.05 s의 시간 전진을 수행하여 얻게 된 압상력의 변동값들을 이용하여 압상력의 표준편차를 계산하였다. 따라서 유속 조건 하나당 0.15 s, 즉 30,000회의 계산을 수행하였으며, 속도는 낮은 속도로부터 증속하였다.

경계 조건의 경우에는 유동 유입 부분은 Velocity inlet 조건으로 설정하였으며 출구 부분은 Pressure outlet 조건으로, 나머지 영역은 Symmetry 조건으로 하였다. 유속의 경우 한국항공우주연구원 풍동시험 결과와의 비교·검증을 위해 36 km/h에서 증속하여 72, 126, 144, 162 km/h의 5가지 속도에 대해 계산을 수행하였다. 그리고 72, 126, 144, 162 km/h의 4가지 속도에 대해 비교하였다. 이후 목표 속도 400 km/h까지 50 km/h 간격으로 하여 200, 250, 300, 350, 400 km/h의 5가지 속도에서 계산을 수행하였다. 이 때 공기유동에 의한 압상력은 팬터그래프 팬 헤드 고체면에 작용하는 압력을 면적분하여 계산하며 압상력 표준편차는 이러한 압상력의 시간에 대한 변동값을 통계적으로 처리하여 계산한다. Table 1에 본 연구에서 해석 기법 검증 및 실제 유속에서의 시뮬레이션을 위해 계산을 수행한 유속 조건에 대해 정리하였다.

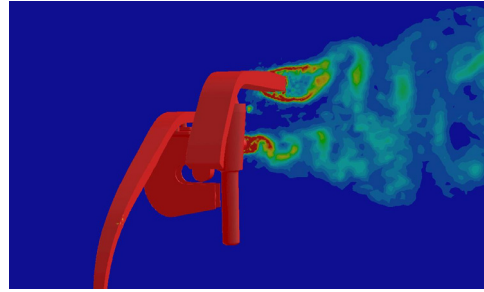
4. 해석 결과

4.1 해석 기법 검증

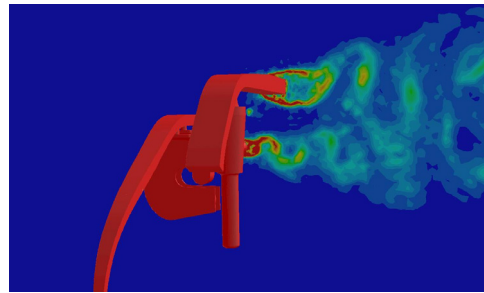
격자계 및 해석 조건 설정 등의 적합성을 검증하기 위해 본 연구에서는 Table 1과 같이 36 km/h의 저속에서부터 시작하여 증속하면서 72, 126, 144, 162 km/h 속도에서의 해



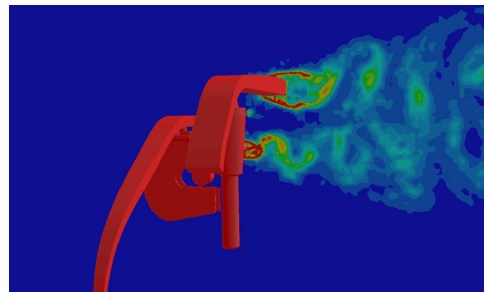
(a) t=0.15 s



(b) t=0.1505 s



(c) t=0.1510 s



(d) t=0.1515 s

Fig. 6 Vorticity contour (144 km/h)

석을 수행하였다. 이 중 144 km/h 속도에서의 팬터그래프 팬 헤드 압력 분포를 Fig. 5에 도시하였다. 비물리적인 현상이 발생하지 않고 정체압력 및 유동의 가속으로 인한 저압 영역 등이 잘 계산되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 6에는 팬 헤드에서 박리되는 유동에 의해 시간에 따라 변화하는 Vorticity를 도시하였다. 그림에서 팬 헤드 위/아래의 단면부에서 유동이 소산되지 않고 잘 박리되어 팬 헤드의 후방에서 Vortex shedding을 일으키고 있음을 알 수

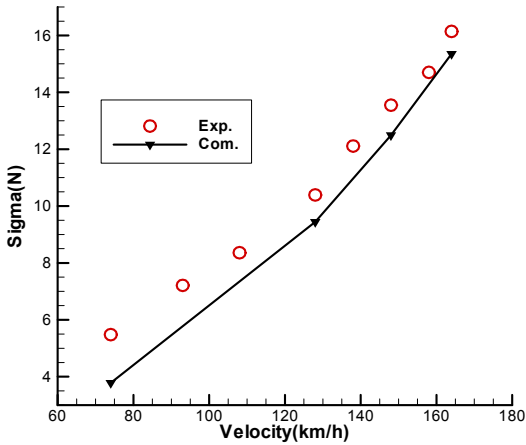


Fig. 7 Comparison of the standard deviation (σ) of contact force

Table 2 Comparison of σ of each flow case

Velocity (km/h)	Exp. (N)	Com. (N)	Error (%)
72	5.5	3.8	30.9
126	10.4	9.4	9.6
144	13.6	12.5	8.1
162	16.1	15.4	4.3

있다. 또한 팬 헤드 단면에서 박리된 유동이 팬 헤드 후방에서 합쳐지면서 보다 복잡한 유동 패턴을 형성함을 확인할 수 있다. 따라서 현재의 격자계 및 해석 기법을 통하여 팬 헤드에서의 박리 유동을 잘 모사할 수 있음을 확인하였다.

정량적인 비교를 위해 각각의 속도에서 해석을 통하여 얻은 압상력 변동의 표준편차값을 Fig. 7과 같이 풍동시험 결과와 비교하였으며 그 값을 Table 2에 정리하였다. 72 km/h 등의 저속에서는 실험값과 해석값이 비교적 큰 차이를 보이는데 이는 압상력 변동 해석을 위해 팬 헤드만을 해석한 것에서 기인한다. 즉 고속의 경우 팬 헤드에서의 압상력 변동값이 팬터그래프 전체 압상력 변동에 주요한 영향을 미치기 때문에 실험값과 해석값이 비슷하지만 저속의 경우에는 팬 헤드만의 압상력 변동값이 작기 때문에 실험값과 차이를 보이고 있다. 그러나 속력이 상승하게 되면서 전체 압상력 변동에 팬 헤드 압상력 변동이 지배적인 영향을 미치기 때문에 그 오차가 줄어들고 있으며 그 결과 실험값과의 오차가 10% 내인 약 1 N 내외로 비교적 정확하게 계산되었음을 확인할 수 있다. 따라서 현재의 격자계와 해석 기법이 팬 헤드에서의 공기력 변동의 의한 압상력 표준편차를 계산하는 데에 적합함을 확인하였다.

4.2 고속 주행 시 압상력 변동 해석

검증된 격자계 및 해석 기법을 바탕으로 하여 200, 250, 300, 350, 400 km/h의 5가지 속도에서의 공기력에 의한 압

Table 3 Comparison of σ of each flow case

Velocity (km/h)	Est. (N)	Com. (N)	Error (%)
200	23.8	22.9	3.8
250	37.1	34.2	7.8
300	54.0	51.0	5.5
350	74.3	69.6	6.3
400	98.2	92.3	6.0

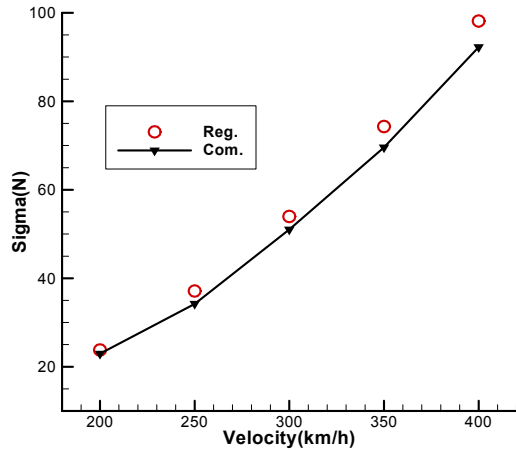


Fig. 8 Comparison of the standard deviation (σ) of contact force

상력 변동의 표준편차값에 대한 계산을 수행하였다. 또한 풍동시험결과를 토대로 2차 다항식을 이용한 회귀분석을 수행하여 표준편차값을 예측하였다. 그리고 회귀분석을 통한 예측값과 유동 해석을 통한 계산값을 Table 3에 제시하였으며 Fig. 8에 비교하여 도시하였다. 비물리적인 결과 없이 해석이 잘 수행되었으며 오차율은 10% 이내로 계산되었음을 알 수 있다. 따라서 LES를 이용한 비정상 유동해석이 고속 주행 시에도 비교적 신뢰할 만한 결과를 도출하고 있음을 확인하였다. 이 때 표준편차의 최대값은 400 km/h에서 92 N으로 계산되었다.

이러한 계산 결과를 토대로 공기력 변동으로 인한 팬 헤드와 가선과의 이선 현상이 발생하는지 확인하기 위해 이선율의 계산을 수행하였다. 이 때 이선율 계산을 위해 팬터그래프 형상 개발 최종보고서에서 제시한 값들을 이용하였다.⁽⁸⁾ 보고서에 따르면 EN 규정에서 열차 주행 속도 350 km/h에서의 압상력 권장 최저치는 약 167 N, 권장 최고치는 약 210 N으로 평균적으로는 약 190 N이다. 또한 고속 주행 시 팬터그래프의 유입 속도는 경계층 성장에 의해 열차 속도의 80% 정도로 유입된다. 따라서 열차 속도 350 km/h인 경우 팬터그래프에서의 유속은 280 km/h이다. 유동해석 결과를 토대로 한 280 km/h에서의 표준편차값은 약 43.6 N이며 공력에 의한 이선율 ($F_{mean} - 3\sigma$)는 대략 59 N이다. 따라서 350 km/h의 주행속도에서는 통계학적으로 이선 현상이 발생하지 않음을 확인하였다.

5. 결 론

고속열차 팬터그래프 시스템의 집전 성능 향상을 위하여 공기력에 의한 팬터그래프 팬 헤드의 압상력 변화에 대한 3차원 비정상 유동 해석을 수행하였다. 우선 해석 기법 및 격자계의 적합성 검증은 위해 72, 126, 144, 162 km/h의 4가지 속도에 대해 압상력 변동의 표준편차값을 한국항공우주 연구원의 풍동시험 결과와 비교하였다. 그 결과 실험값과의 오차가 10% 내인 1 N 내외로 저속 영역을 제외하고는 비교적 정확하게 유동 해석이 수행되었음을 확인하였다.

이러한 해석 기법 및 격자계를 바탕으로 하여 고속 열차 실제 주행 속도대인 200 km/h에서 400 km/h까지의 영역에 대해서 다시 비정상 유동 해석을 수행하여 압상력 변동의 표준편차값을 예측하였으며 그 결과 400 km/h에서 최대 92 N으로 표준편차값이 계산되었다. 또한 풍동시험 결과를 이용한 회귀분석을 통하여 계산된 예측값과의 오차는 10% 이내로 매우 근접하고 있음을 확인할 수 있었다. 이렇게 계산된 CX 팬터그래프의 압상력 변동 표준편차를 이용하여 공기력 변동에 따른 이선을 예측을 수행하였다. 그 결과 공기력 변동이 발생하더라도 통계적인 관점에서 350 km/h의 열차 주행 시에 CX 팬터그래프에 이선 현상이 발생하지 않음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 철도기술연구사업 중 ‘철도 핵심부품 및 장치 기술개발 2단계’ 과제의 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) Kang, H. M., Cho, T. H., Kim, C. W., Yoon, S. H., Kwon, H. B., and Park, C. S., 2011, “The Aerodynamic Analysis of Pantograph of the Next Generation High Speed Train,” In Proceeding of the 2011 Spring Conference of the Korean Society of Computational Fluid Engineering, pp. 362~367.
- (2) Lee, Y. B., Kwak, M. H., Kim, K. H., Lee, D. H., Jeong, H. S., Jang, Y. I., and Kwon, H. B., 2011, “Experimental Studies on Improvement of Aerodynamic Performance of Pantograph System for HEMU-400X,” KSR Spring Conference, pp. 1~6.
- (3) Kang, H. M., Kim, C. W., Cho, T. H., Kim, D. H., Yoon, S. H., and Kwon, H. B., 2012, “Numerical Analysis of Aerodynamic Performance of the Pantograph of a High Speed Train according to Pantograph Covers,” Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 18~24.
- (4) Nam, S. W., Kwon, H. B., and Yoon, S. H., 2012, “Characteristics Method Analysis of Wind Pressure of Train Running in Tunnel,” Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 15, No. 5, pp. 436~441.
- (5) Oh, H. K., Ji, H. M., Kim, Y. G., and Kim, S., 2014, “Analysis of the Current Collection Quality for Next Generation High-Speed Trains with Measurements of the Dynamic Contact Force,” Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 17, No. 3, pp. 157~164.
- (6) Lee, S. A., Kang, H. M., Lee, Y. B., Kim, C. W., and Kim, K. H., 2015, “The Aero-Acoustic Analysis for Each Part of Double Arm Pantograph of High Speed Train,” Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 61~66.
- (7) Kwon, H. B., 2015, “A Study on the Minimum Cross-Sectional Area of High Speed Railway Tunnel Satisfying Passenger Ear Discomfort Criteria,” Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 20, No. 3, pp. 62~69.
- (8) 2015, “Aerodynamic Design Technology of High Speed Train Pantograph for Aerodynamic Noise and Drag Reduction and Development of Full-Scale Pantograph Shape,” 14PRTD-C061723-03.
- (9) 2001, EN50119, “Railway Application - Fixed Installation - Electric Traction Overhead Contact Lines,” September.
- (10) ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, Ch. 4.
- (11) Jameson A., 2009, “An Assessment of Dual-Time Stepping, Time Spectral and Artificial Compressibility based Numerical Algorithms for Unsteady Flow Applications to Flapping Wings,” 19th AIAA Computational Fluid Dynamics, AIAA 2009-4273.